

Научная статья
УДК 621.771.014

DOI: <https://doi.org/10.18721/JEST.29109>



Е.А. Панин¹ ✉, Г.Е. Ахметова¹, И.Е. Волокитина²

¹ Карагандинский индустриальный университет,
г. Темиртау, Республика Казахстан;

² Рудненский индустриальный институт,
г. Рудный, Республика Казахстан

✉ ye.panin@tttu.edu.kz

ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ СИЛОВЫХ ПАРАМЕТРОВ СОВМЕЩЕННОГО ПРОЦЕССА «РКУП-ЛАЙНЕКС»

Аннотация. В статье представлены теоретические исследования нового процесса деформации, сочетающего этапы равноканального углового прессования и схему «Лайнекс». Для анализа результирующих деформационных усилий были отдельно рассмотрены этапы прессования в матрице и обжата цепным конвейером. Были получены уравнения для определения усилий, действующих на приводной шкив, РКУ матрицу и звено конвейера. Пробный расчет и сравнительный анализ с ранее известным процессом «прокатка-РКУП» показали, что новый процесс «РКУП-Лайнекс» обеспечивает стабильный процесс деформации с меньшими усилиями и меньшим углом стыка каналов в матрице. Проведена проверка полученных значений по уравнениям с использованием компьютерного моделирования методом конечных элементов в программе Deform. Сравнение значений показало, что значения усилий при расчете и моделировании имеют высокий уровень сходимости. Во всех трех рассмотренных деталях величина погрешности не превышала 3%. Материалы статьи представлены на Международной научно-практической конференции «Перспективные машиностроительные технологии (Advanced Engineering Technologies) АЕТ 2022», проходившей в Санкт-Петербурге 21–25 ноября 2022 года.

Ключевые слова: интенсивная пластическая деформация, равноканальное угловое прессование, Лайнекс, комбинированный процесс, уравнение усилия, моделирование.

Благодарности: Данное исследование было профинансировано Комитетом науки Министерства образования и науки Республики Казахстан (Грант № AP13067723).

Для цитирования:

Панин Е.А., Ахметова Г.Е., Волокитина И.Е. Теоретическое исследование силовых параметров совмещенного процесса «РКУП-Лайнекс» // Глобальная энергия. 2023. Т. 29, № 1. С. 157–169. DOI: <https://doi.org/10.18721/JEST.29109>



*E.A. Panin*¹ ✉, *G.E. Akhmetova*¹, *I.E. Volokitina*²

¹ Karaganda Industrial University,
Termitau, Republic of Kazakhstan;

² Rudny Industrial Institute,
Rudny, Republic of Kazakhstan

✉ ye.panin@tttu.edu.kz

THEORETICAL STUDY OF THE FORCE PARAMETERS OF ECAP-LINEX COMBINED PROCESS

Abstract. The paper presents theoretical studies of a new deformation process combining the stages of equal-channel angular pressing and the Linex scheme. To analyze the resulting deformation forces, the stages of pressing in a matrix and compression by a chain conveyor were separately considered. Equations for determining the forces acting on the drive pulley, ECA matrix and the chain element link were obtained. A trial calculation and comparative analysis with the previously known rolling-ECAP process showed that the new ECAP-Linex process enables a stable deformation process with lower forces and a smaller channel junction angle in the matrix. Verification of the obtained values by equations using FEM computer simulation in the Deform program was performed. Comparison of values showed that the force values in the calculation and simulation have a high level of convergence. In all three considered details the difference value did not exceed 3%. The materials of the article were presented at the International Scientific and Practical Conference "Advanced Engineering Technologies AET 2022" held in St. Petersburg on November 21–25, 2022.

Keywords: severe plastic deformation, equal-channel angular pressing, Linex, combined process, force equation, simulation.

Acknowledgements: This study was funded by the Science Committee of the Ministry of Education and Science of the Republic of Kazakhstan (Grant No. AP13067723).

Citation:

E.A. Panin, G.E. Akhmetova, I.E. Volokitina, Theoretical study of the force parameters of ECAP-Linex combined process, *Global Energy*, 29 (01) (2023) 157–169, DOI: <https://doi.org/10.18721/JEST.29109>

Введение. Несмотря на то, что процессы интенсивной пластической деформации являются эффективным способом измельчения структуры металла [1–5], большинство этих способов остаются используемыми лишь в лабораторных условиях. Главными недостатками данных технологий является отсутствие непрерывности или невозможность обработки длинных заготовок. Были предприняты попытки обойти эти ограничения за счет разработки совмещенных процессов, где объединяются два и более дискретных процесса [6–12]. Данные способы хорошо зарекомендовали себя как в плане эффективности проработки металла, так и производительности процесса деформирования. Поэтому разработка новых совмещенных процессов деформирования является одним из наиболее перспективных направлений в обработке давлением.

В работе [13] были предложены новые концепции совмещенных процессов обработки давлением, одним из которых является совмещенный процесс «РКУП – Лайнекс» (рис. 1). Данный способ предназначен для непрерывного прессования цветных металлов и сплавов, его ключевым отличием от классического процесса Лайнекс будет возможность деформирования без существенного изменения исходных размеров заготовки.

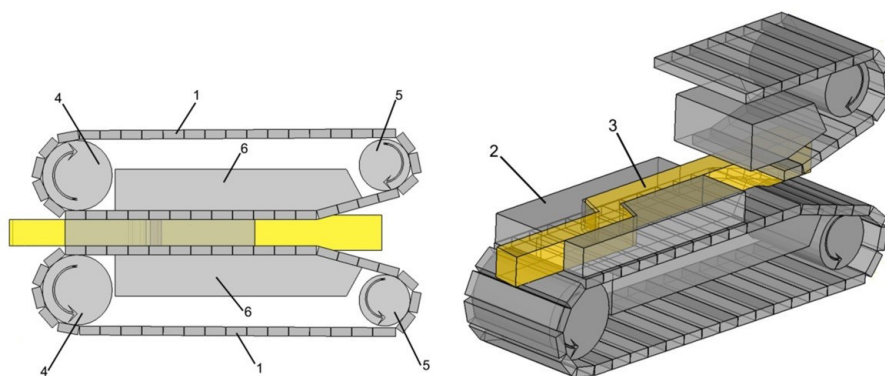


Рис. 1. Совмещенный процесс «РКУП – Лайнекс»: 1 – подвижные ленточные блоки, 2 – равноканальная угловая матрица, 3 – заготовка, 4 – холостые шкивы, 5 – приводные шкивы, 6 – неподвижные стопорные блоки

Fig. 1. "ECAP – Linex" combined process: 1 - movable belt blocks, 2 – equal-channel angular matrix, 3 – blank, 4 – idle pulleys, 5 – drive pulleys, 6 – fixed locking blocks

Деформирование в данном устройстве осуществляется следующим образом. Заготовка подается к устройству, где подвижные ленточные блоки захватывают заготовку и проталкивают ее через каналы неподвижной матрицы. Каждый ленточный захватывающий блок одет на два шкива, один из которых холостой, а другой приводится во вращение электродвигателем. Именно за счет этого ленточные захватывающие блоки приводятся в движение. Горизонтальная образующая ленточных захватывающих блоков создается за счет их движения по заготовке и неподвижным стопорным блокам, выполняющим прижимную роль.

Важнейшим этапом перед практической реализацией любого разрабатываемого процесса деформирования является его теоретическое исследование, которое обычно проводится с целью предварительной оценки возникающих энергосиловых параметров. Корректируя их значения, возможно добиться условий стабильного протекания процесса деформирования, т.е. таких условий, при которых деформирование будет проходить без вынужденных остановок, вызванных заклиниванием заготовки в инструменте.

Аналитическое определение усилий

В разрабатываемом процессе «РКУП – Лайнекс» ключевым элементом деформирования является равноканальная угловая матрица с параллельными каналами. Ленточные конвейеры выполняют двойную роль. Во-первых, они продвигают заготовку вдоль каналов матрицы за счет сцепления с заготовкой. Во-вторых, они сообщают заготовке некоторое обжатие по высоте, за счет которого развивается основной уровень активных сил трения, способствующий продвижению заготовке по каналам матрицы.

Поэтому для стабильного протекания процесса деформирования по предложенной схеме необходимо соблюдение условия:

$$P_{\text{КОНВ}} > P_{\text{МАТР}}, \quad (1)$$

где $P_{\text{КОНВ}}$ – усилие, создаваемое ленточным конвейером; $P_{\text{МАТР}}$ – усилие противодействия, создаваемое матрицей.

Рассмотрим каждое из этих усилий отдельно. Для нахождения усилия противодействия, создаваемого матрицей, целесообразно воспользоваться формулой усилия прессования в данной матрице, которая была выведена в работе [14]:

$$P_{\text{ПРЕСС}} = 2\sigma_s\mu_2 \left[(2l_1 + l_2)(b_1 + h_1) + 2h_1^2 \text{tg} \frac{\varphi}{2} + \frac{\text{tg}\varphi \cdot h_1}{\sqrt{3}\mu_2} \right], \quad (2)$$

где h_1 – высота заготовки, мм; b_1 – ширина заготовки, мм; l_1 – длина первого канала матрицы, мм; l_2 – длина второго канала матрицы, мм; μ_2 – коэффициент трения в матрице; σ_s – сопротивление металла пластической деформации (можно принять за предел текучести); φ – угол пересечения каналов матрицы.

Здесь авторами работы [14] было сделано допущение, что входной и выходной каналы имеют одинаковую протяженность. При несоблюдении данного условия формула (2) приобретает вид:

$$P_{\text{ПРЕСС}} = 2\sigma_s\mu_2 \left[(l_1 + l_2 + l_3)(b_1 + h_1) + 2h_1^2 \text{tg} \frac{\varphi}{2} + \frac{\text{tg}\varphi \cdot h_1}{\sqrt{3}\mu_2} \right]. \quad (3)$$

Данная формула характеризует теоретическое максимальное усилие, возникающее в момент, когда заготовка находится во всех трех каналах матрицы. В реальных условиях прессования оно всегда будет несколько меньше по причине того, что при движении пуансона объем металла, находящийся в первом канале, будет постоянно уменьшаться.

В разрабатываемом процессе «РКУП – Лайнекс» от данной конструкции матрицы будут присутствовать лишь фигурные элементы, образующие канал. Боковые стенки отсутствуют, поскольку их роль выполняют элементы ленточного конвейера. Поэтому формула (3) применительно к фигурным элементам матрицы получает вид:

$$P_{\text{МАТР}} = 2\sigma_s\mu_2 h_1 \left[(l_1 + l_2 + l_3) + 2h_1 \text{tg} \frac{\varphi}{2} + \frac{\text{tg}\varphi}{\sqrt{3}\mu_2} \right]. \quad (4)$$

Для нахождения усилия, создаваемого ленточным конвейером, необходимо подробнее рассмотреть участок, на котором заготовка получает обжатие. Здесь возможны две рациональные схемы движения ленты вдоль стопорного блока – угловой и радиальный (рис. 2).

Наиболее оптимальным вариантом будет радиальное исполнение (рис. 2б), поскольку в данном случае в зоне контакта заготовки и инструмента нижний угол будет отсутствовать. При движении цепных элементов вдоль неподвижного стопорного элемента при попадании на угол на поверхности заготовки будут образовываться пережимы, в радиальном исполнении такие пережимы будут минимальными или же полностью отсутствовать, что зависит от ширины звеньев цепного элемента. При этом необходимо отметить, в обоих случаях протяженности кривых, ограничивающих очаг деформации, являются соизмеримыми, разница их длин составляет около 0,5%. Поэтому для удобства расчета можно принять форму данного очага деформации за форму прокатного типа, образуемую прокатными валками.

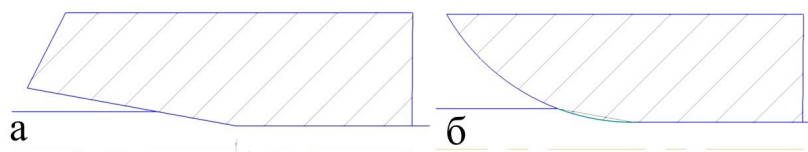


Рис. 2. Участок обжатия заготовки ленточным конвейером
Fig. 2. "ECAP – Section of workpiece compression by a belt conveyor

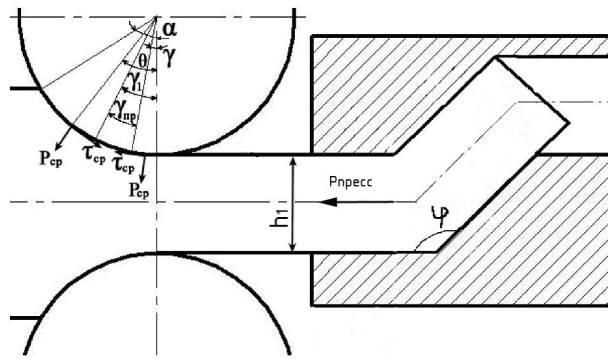


Рис. 3. Очаг деформации в конвейере
Fig. 3. Deformation zone in the conveyor

В этом случае очаг деформации можно представить следующим образом (рис. 3). Сумму всех сил действующих в очаге деформации, определим по формуле:

$$R_{\text{ОБЖ}} = 2b_{\text{cp}} \int_{\gamma_1}^{\alpha} \tau_{\text{cp}} R \cos \theta d\theta - 2b_{\text{cp}} \int_0^{\gamma} \tau_{\text{cp}} R \cos \theta d\theta - 2b_{\text{cp}} \int_0^{\alpha} p_{\text{cp}} R \sin \theta d\theta, \quad (5)$$

где b_1 и b_{cp} – ширина заготовки после обжатия и средняя ширина; τ_{cp} и p_{cp} – средние касательное и нормальное напряжения; R – радиус кривизны стопорного блока (аналог радиуса валков); θ – текущий угол; α – угол захвата; γ , γ_1 – углы, характеризующие протяженности зон опережения и отставания соответственно.

Проинтегрируем уравнение (5) с учетом допущения, что $b_{\text{cp}} = b_1$:

$$P_{\text{ОБЖ}} = 2b_1 R \tau_{\text{cp}} (\sin \alpha - \sin \gamma_1) - 2b_1 R \tau_{\text{cp}} (\sin \gamma - 0) - 2b_1 R p_{\text{cp}} (-\cos \alpha + 1). \quad (6)$$

Заменив в данном уравнении $1 - \cos \alpha = \alpha^2/2$, $\sin \alpha = \alpha$, $\sin \gamma_1 = \gamma_1$, $\sin \gamma = \gamma$, а также с учетом, что $\tau_{\text{cp}} = p_{\text{cp}} \mu = \sigma_s \mu$, получим:

$$P_{\text{ОБЖ}} = 2b_1 R \sigma_s \mu_1 (\alpha - \gamma_1) - 2b_1 R \sigma_s \mu_1 \gamma - 2b_1 R \sigma_s \frac{\alpha^2}{2}, \quad (7)$$

где μ_1 – коэффициент трения в очаге деформации.

Окончательно получаем:

$$P_{\text{ОБЖ}} = 2b_1 R \sigma_s \mu_1 \left(\alpha - \gamma_1 - \gamma - \frac{\alpha^2}{2\mu_1} \right). \quad (8)$$

Из формулы (8) видно, что при равных геометрических условиях в очаге деформации величина усилия обжатия будет зависеть от значений углов γ и γ_1 , которые зависят от величины усилия противодействия, создаваемого матрицей. Иными словами, в одном и том же угле обжатия α каждый раз будут различными зоны опережения, отставания и прилипания. Поэтому для использования формулы (8) необходимо найти значения данных углов.

Уравнения равновесия сил и моментов, действующих в симметричном очаге деформации при прокатке с передним подпором, который возникает из-за дополнительного формоизменения в матрице, установленной за валками, имеют вид:

$$2b_{cp} \int_{\gamma_1}^{\alpha} \tau_{cp} R \cos \theta d\theta - 2b_{cp} \int_0^{\gamma} \tau_{cp} R \cos \theta d\theta - 2b_{cp} \int_0^{\alpha} p_{cp} R \sin \theta d\theta - \sigma_1 b_1 h_1 = 0; \quad (9)$$

$$2b_{cp} \tau_{cp} R^2 (\alpha - \gamma_1) - 2b_{cp} \tau_{cp} R^2 \gamma - 2b_{cp} \psi R \alpha * \left(\int_0^{\alpha} p_{cp} R \cos \theta d\theta + \int_{\gamma_1}^{\alpha} \tau_{cp} R \sin \theta d\theta - \int_0^{\gamma} \tau_{cp} R \sin \theta d\theta \right) - \sigma_1 b_1 h_1 R = 0, \quad (10)$$

где σ_1 – подпиральное напряжение; ψ – коэффициент положения плеча равнодействующей давления металла на валки; α и γ – угол захвата и угол, характеризующий протяженность зоны опережения.

С учетом допущения, что $b_{cp} = b_1$, после преобразований получим:

$$\int_{\gamma_1}^{\alpha} \tau_{cp} \cos \theta d\theta + \int_0^{\gamma} \tau_{cp} \cos \theta d\theta - \int_0^{\alpha} p_{cp} \sin \theta d\theta - \frac{\sigma_1 h_1}{2R} = 0; \quad (11)$$

$$\tau_{cp} (\alpha - \gamma_1) - \tau_{cp} \gamma - \psi \alpha * \left(\int_0^{\alpha} p_{cp} \cos \theta d\theta + \int_{\gamma_1}^{\alpha} \tau_{cp} \sin \theta d\theta + \int_0^{\gamma} \tau_{cp} \sin \theta d\theta \right) - \frac{\sigma_1 h_1}{2R} = 0. \quad (12)$$

Проинтегрировав уравнение (11) с учетом допущений, принятых для уравнения (7), а также с учетом, что $\gamma_1 = \gamma_{np} + \gamma$, после преобразований найдем зависимость для определения угла, характеризующего протяженность зоны прилипания:

$$\gamma_{np} = \alpha - 2\gamma - \frac{p_{cp} \alpha^2}{2\tau_{cp}} - \frac{\sigma_1 h_1}{2\tau_{cp} R}. \quad (13)$$

После замены $p_{cp} / \tau_{cp} = 1/\mu$, $\tau_{cp} = \sigma_s \mu$ уравнение (13) преобразуется к виду:

$$\gamma_{np} = \alpha - 2\gamma - \frac{\alpha^2}{2\mu} - \frac{\sigma_1 h_1}{2\mu \sigma_s R}, \quad (14)$$

где μ – коэффициент трения; σ_s – фактическое сопротивление деформации.

После интегрирования и преобразования уравнения (12) получаем:

$$\alpha - \gamma_1 - \gamma = \psi \alpha * \left(\frac{p_{cp}}{\tau_{cp}} \alpha - \cos \alpha + \cos \gamma_1 + \cos \gamma - 1 \right) + \frac{\sigma_1 h_1}{2\tau_{cp} R}. \quad (15)$$

Преобразуем полученное выражение в квадратное уравнение, проведя замены, аналогичные, как при решении уравнения (11):

$$2\gamma^2 - \gamma \left(2\alpha - \frac{\alpha^2}{\mu} - \frac{\sigma_1 h_1}{2\mu \sigma_s R} \right) + \frac{\alpha}{\mu} \left(\frac{1}{\psi} - 2 - \alpha^2 + \frac{\alpha^3}{4\mu} - \frac{\sigma_1 h_1}{\sigma_s R} + \frac{\alpha \sigma_1 h_1}{2\mu \sigma_s R} + \frac{\sigma_1^2 h_1^2}{4\mu \sigma_s^2 R^2 \alpha} \right) = 0. \quad (16)$$

Одним из корней квадратного уравнения (16) будет угол, характеризующий протяженность зоны опережения:

$$\gamma = \frac{\left(2\alpha - \frac{\alpha^2}{\mu} - \frac{\sigma_1 h_1}{2\mu\sigma_s R}\right) - \sqrt{\left(2\alpha - \frac{\alpha^2}{\mu} - \frac{\sigma_1 h_1}{2\mu\sigma_s R}\right)^2 - 8\frac{\alpha}{\mu}\left(\frac{1}{\psi} - 2 - \alpha^2 + \frac{\alpha^3}{4\mu} - \frac{\sigma_1 h_1}{\sigma_s R} + \frac{\alpha\sigma_1 h_1}{2\mu\sigma_s R} + \frac{\sigma_1^2 h_1^2}{4\mu\sigma_s^2 R^2 \alpha}\right)}}{4} \quad (17)$$

Для нахождения данного угла, характеризующего зону опережения, по уравнению (16) необходимо предварительно определить значение коэффициента положения плеча равнодействующей ψ . Для этого рассмотрим условия, при которых уравнение (16) имеет смысл:

$$\left(2\alpha - \frac{\alpha^2}{\mu} - \frac{\sigma_1 h_1}{2\mu\sigma_s R}\right)^2 > 8\frac{\alpha}{\mu} * \left(\frac{1}{\psi} - 2 - \alpha^2 + \frac{\alpha^3}{4\mu} - \frac{\sigma_1 h_1}{\sigma_s R} + \frac{\alpha\sigma_1 h_1}{2\mu\sigma_s R} + \frac{\sigma_1^2 h_1^2}{4\mu\sigma_s^2 R^2 \alpha}\right); \quad (18)$$

$$\frac{1}{\psi} - 2 - \alpha^2 + \frac{\alpha^3}{4\mu} - \frac{\sigma_1 h_1}{\sigma_s R} + \frac{\alpha\sigma_1 h_1}{2\mu\sigma_s R} + \frac{\sigma_1^2 h_1^2}{4\mu\sigma_s^2 R^2 \alpha} > 0. \quad (19)$$

Решая неравенства (18) и (19) совместно, найдем пределы, в которых изменяется величина $1/\psi$:

$$\frac{\mu}{8\alpha} \left(2\alpha - \frac{\alpha^2}{\mu} - \frac{\sigma_1 h_1}{2\mu\sigma_s R}\right)^2 + 2 + \alpha^2 - \frac{\alpha^3}{4\mu} + \frac{\sigma_1 h_1}{\sigma_s R} - \frac{\alpha\sigma_1 h_1}{2\mu\sigma_s R} - \frac{\sigma_1^2 h_1^2}{4\mu\sigma_s^2 R^2 \alpha} > \frac{1}{\psi} > 2 + \alpha^2 - \frac{\alpha^3}{4\mu} + \frac{\sigma_1 h_1}{\sigma_s R} - \frac{\alpha\sigma_1 h_1}{2\mu\sigma_s R} - \frac{\sigma_1^2 h_1^2}{4\mu\sigma_s^2 R^2 \alpha}. \quad (20)$$

Приняв допущение, что величина $1/\psi$ находится в средней части обозначенных пределов, получаем:

$$\frac{1}{\psi} = \frac{\mu}{16\alpha} \left(2\alpha - \frac{\alpha^2}{\mu} - \frac{\sigma_1 h_1}{2\mu\sigma_s R}\right)^2 + 2 + \alpha^2 - \frac{\alpha^3}{4\mu} + \frac{\sigma_1 h_1}{\sigma_s R} - \frac{\alpha\sigma_1 h_1}{2\mu\sigma_s R} - \frac{\sigma_1^2 h_1^2}{4\mu\sigma_s^2 R^2 \alpha}. \quad (21)$$

Зная величину углов, характеризующих протяженность зон опережения и прилипания, угол, характеризующий зону отставания, можно найти из условия:

$$\gamma_{от} = \alpha - \gamma_{пр} - \gamma. \quad (22)$$

Однако в данном совмещенном процессе полезное усилие, проталкивающее заготовку через каналы матрицы, выражается не только формулой (8). Здесь помимо усилия обжатия будет также присутствовать и усилие от трения заготовки о звенья цепного элемента, поскольку их движение направлено в ту же сторону, что и движение заготовки.

Поэтому максимально возможное усилие, создаваемое ленточным конвейером, в момент, когда заготовка полностью заполняет все каналы матрицы

$$P_{\text{конв}} = 2b_1\sigma_s\mu_1 \left[R \left(\alpha - \gamma_1 - \gamma - \frac{\alpha^2}{2\mu_1} \right) + (l_1 + l_2 + l_3) \right]. \quad (23)$$

При этом усилие продвижения заготовки одним звеном цепного элемента будет равно:

$$P_{1_эл} = 2\sigma_s\mu_1 b_1 l_{эл}, \quad (24)$$

где $l_{эл}$ – длина звена единичного звена цепного элемента.

Результаты и обсуждение

Был выполнен пробный расчет со следующими исходными данными: $R = 50$ мм, $b_1 = 10$ мм, $h_1 = 10$ мм, $\Delta h = 3$ мм, $\mu_1 = 0,7$, $\mu_2 = 0,08$, $l_1 = 30$ мм, $l_2 = 20$ мм, $l_3 = 15$ мм, $\sigma_s = 60$ МПа (предел текучести пруткового алюминиевого сплава АД31 без предварительной термической обработки при комнатной температуре, согласно ГОСТ 21488-97). При вводе алгоритма в среду Microsoft Excel и варьировании величины угла стыка каналов в матрице от 90° до 180° были получены следующие данные (рис. 4а).

Поскольку рассматриваемая схема деформирования по своей сути близка к ранее упомянутой схеме «прокатка-РКУП», будет целесообразно провести сравнительный анализ данных технологий. Для этого был построен аналогичный график усилий (рис. 4б). Целью сравнительного анализа была оценка возникающих усилий при одинаковых исходных данных.

Анализируя полученные графики, можно отметить следующее:

1) графики усилия противодействия и усилия прессования имеют экспоненциальный характер, т.е. со снижением величины угла значения усилий возрастают в геометрической прогрессии. При этом по абсолютному значению усилие в процессе «РКУП – Лайнекс» ниже примерно на 40-50% для наиболее пологого участка значений угла стыка от 120° до 180° .

2) усилие, создаваемое конвейером имеет более пологий вид, чем усилие прокатки. Это объясняется тем, что помимо непосредственного усилия обжатия в очаге деформации здесь также присутствует компонент усилия от трения заготовки о звенья цепного элемента. За счет этого данное усилие все еще имеет зависимость от угла стыка каналов, но уже не такое явное, как в процессе «прокатка-РКУП».

3) при заданных исходных данных процесс «РКУП – Лайнекс» будет стабильным при угле стыка каналов менее 120° , тогда как процесс «прокатка-РКУП» будет стабильным при угле стыка каналов менее 132° . Данный фактор говорит о том, что при реализации процесса «РКУП – Лайнекс» создается более высокий уровень активных сил трения, способствующих продвижению заготовки через каналы матрицы. Поэтому в данном случае возможно использование матрицы с более крутым углом, что повысит уровень проработки металла на стадии прессования.

4) Общий уровень усилий в процессе «РКУП – Лайнекс» ниже, чем в процессе «прокатка-РКУП». Это позволяет говорить о повышенной стойкости инструмента при реализации данного совмещенного процесса на практике.

Для подтверждения сделанных выводов были сделаны дополнительные расчеты для различных сечений квадратного и прямоугольного сечений. Для сравнения определялись пределы стабильного процесса, т.е. угол, при котором усилия для каждого процесса уравнивались. В каждом алгоритме изменялись значения высоты и ширины заготовки, остальные параметры не изменялись. Результаты расчетов были сведены в табл. 1.

Данные таблицы 1 полностью подтверждают ранее сделанные выводы. При этом дополнительно можно отметить, что с увеличением ширины заготовки при неизменной ширине общее уравнивающее усилие растет, однако требуемое значение угла снижается. Это происходит потому, что в обоих случаях процесс будет протекать стабильно лишь при выполнении условия (1).

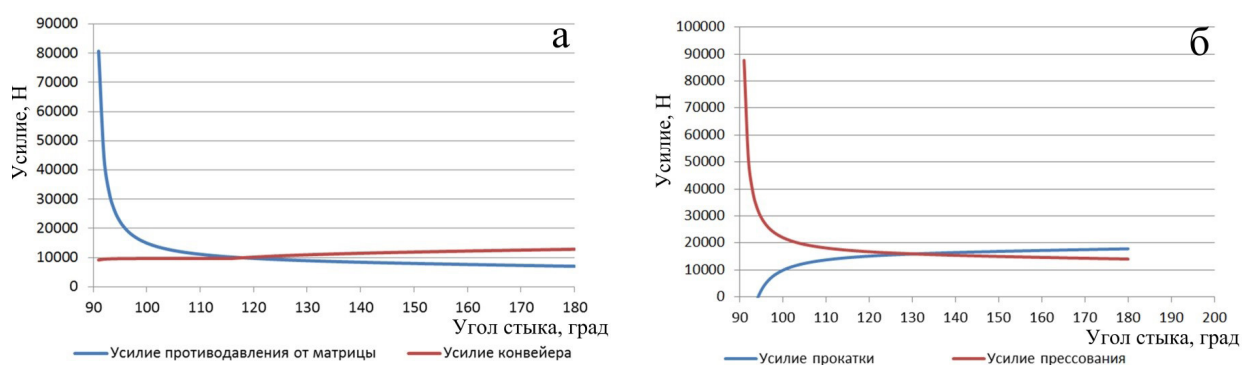


Рис. 4. Зависимости усилий от величины угла стыка каналов:
 а – процесс «РКУП – Лайнекс»; б – процесс «прокатка-РКУП»
 Fig. 4. Force dependences on the value of the channel junction angle:
 а – "ECAP-Linex" process; б – "rolling-ECAP" process

Поэтому при увеличении ширины заготовки более интенсивно растет именно усилие прокатки (конвейера). С увеличением высоты заготовки требуемое усилие и угол стыка увеличиваются. Однако для одного и того же сечения заготовки требуемые величины усилий и угла стыка значительно ниже для процесса «РКУП – Лайнекс».

Таблица 1

Сводные значения усилий для заготовок различных сечений из алюминиевого сплава АД31

Table 1

Summary values of forces for workpieces of various sections made of aluminum alloy AD31

$h \times b$, мм	«РКУП – Лайнекс»		«прокатка-РКУП»	
	$P_{\text{конв}} = P_{\text{матр}}$, Н	Угол φ , град	$P_{\text{прок}} = P_{\text{пресс}}$, Н	Угол φ , град
10 × 10	9970	120	15940	132
10 × 15	13420	112	23750	118
15 × 15	15090	122	24220	136
15 × 20	20130	114	32370	120

Для проверки корректности получаемых значений по формулам была проведена верификация с помощью компьютерного моделирования методом конечных элементов в программе Deform. Для создания модели процесса «РКУП-Лайнекс» были использованы геометрические и технологические параметры, заданные в пробном расчете.

При создании МКЭ-модели данного процесса необходимо корректно задать скоростные параметры деформирующих элементов. Согласно принципу процесса Лайнекс [15], цепные элементы 1 получают движение от вращающихся шкивов 5, при прохождении по контуру неподвижных блоков 6 они захватывают заготовку, обжимают ее и проталкивают через каналы матрицы. Поскольку линейная скорость движения звеньев цепных элементов будет равна линейной скорости на поверхности вращающихся шкивов, то наиболее целесообразно имитировать движение цепных элементов следующим образом. Вращающийся шкив создается с радиусом кривизны неподвижного блока (зеленая дуговая зона на рис. 26). На выходе от вертикальной оси вращения шкивов располагаются фигурные элементы матрицы. На верхней грани матриц, горизонтальная линия которых соответствует уровню нижней точки радиуса шкива последовательно создаются единичные звенья (протяженность звеньев должна быть небольшой, для заданного радиуса шки-

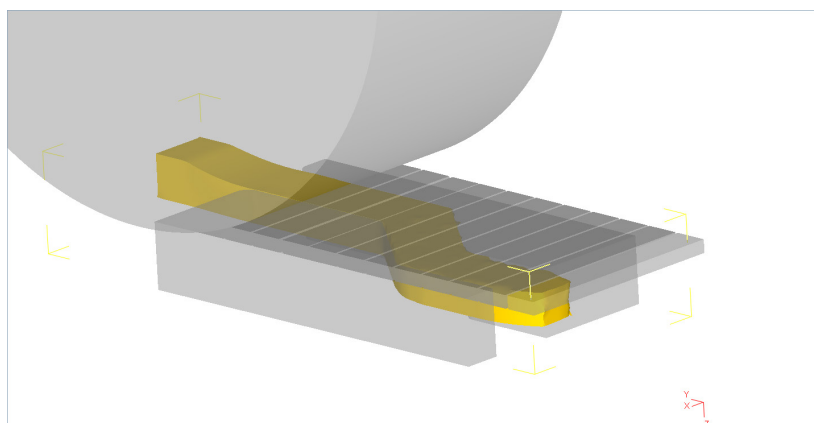


Рис. 5. Рассчитанная модель на конечной стадии

Fig. 5. Calculated model at the final stage

ва 50 мм она была принята 5 мм). С учетом частоты вращения шкивов 15 об/мин (1,57 рад/с) и радиуса равного 50 мм линейная скорость звеньев будет равна 78,5 мм/с.

Для повышения скорости расчета было решено использовать горизонтальную симметрию, т.е. моделировалась $\frac{1}{2}$ толщины заготовки. В соответствии с этим условием исходная заготовка имела ширину 9 мм, высоту 6,5 мм и длину 75 мм. Весь объем заготовки был разбит на 45000 конечных элементов с коэффициентом разности объемов 3, т.е. самый большой элемент по объему был больше самого маленького в 3 раза. После расчета модели было установлено, что с указанными выше параметрами процесс протекает стабильно (рис. 5).

После расчета модели были получены следующие графики усилий для шкива, матрицы и звена цепного элемента (рис. 6).

В табл. 2 приведены значения усилий, полученные при расчете по формулам и при моделировании. Сравнение значений показало высокую сходимость во всех трех случаях.

Таблица 2

Усилия при расчете и моделировании

Table 2

Calculation and modeling forces

	Усилие при расчете, Н	Усилие при моделировании, Н	Разница, %
Шкив	12542	12230	2,48
Матрица	9192	9049	1,55
Звено	4200	4116	2

Выводы

В работе были проведены теоретические исследования совмещенного процесса «РКУП-Лайнекс». Для анализа возникающих усилий деформирования были по отдельности рассмотрены стадии прессования в матрице и обжатия ленточным конвейером. Полученные формулы были использованы в ходе пробного расчета. Сравнительный анализ с ранее известным процессом «прокатка-РКУП» показал, что новый процесс «РКУП-Лайнекс» позволяет осуществлять стабильный процесс деформирования при меньших значениях усилий и меньшей величине угла стыка каналов в матрице, что приведет к повышению уровня проработки металла на стадии прес-

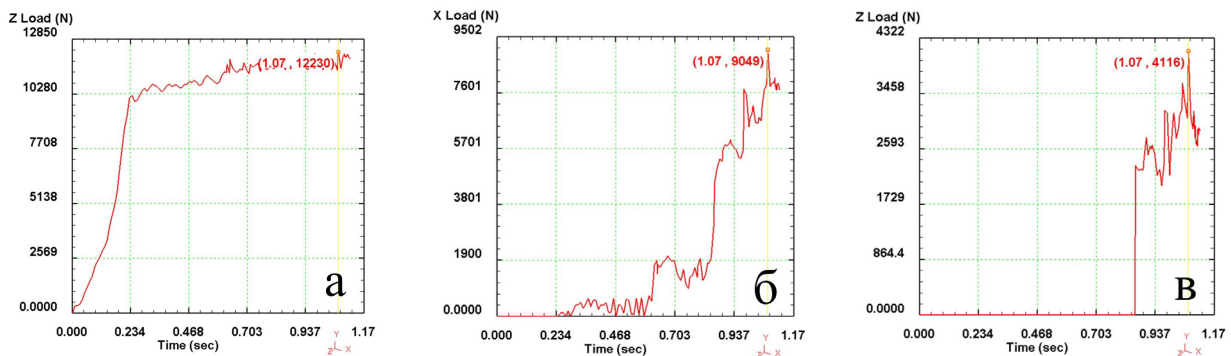


Рис. 6. Усилие при МКЭ моделировании: а – шкив; б – матрица; в – звено

Fig. 6. Force in FEM modeling: a – pulley; b – matrix; c – link

сования. Верификация получаемых значений по формулам с помощью компьютерного моделирования методом конечных элементов в программе Deform показала, что значения усилий при расчете и моделировании имеют высокий уровень сходимости, для всех трех рассмотренных деталей погрешность не превышала 3%.

Материалы статьи представлены на Международной научно-практической конференции «Перспективные машиностроительные технологии (Advanced Engineering Technologies) АЕТ 2022», проходившей в Санкт-Петербурге 21–25 ноября 2022 года.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

- [1] **Zhao H., Ren Y., Yang B., Qin G.** Microstructural evolution of equal channel angular drawn purity titanium at room temperature, *Journal of Alloys and Compounds*, 811 (2019) 152002.
- [2] **Kumar N.** Severe Plastic Deformation of Al–Mg–Si Alloys Processed Through Rolling Techniques: A Review, *Metallography, Microstructure, and Analysis*, 11 (3) (2022) 353–404.
- [3] **Langdon T.G.** A Lifetime of Research in Creep, Superplasticity, and Ultrafine-Grained Materials, *Advanced Engineering Materials*, 22 (1) (2020) 1900442.
- [4] **Wang Z.-R., Si P.-Z., Park J., Choi C.-J., Ge H.-L.** A Review of Ultrafine-Grained Magnetic Materials Prepared by Using High-Pressure Torsion Method, *Materials*, 15 (6) (2022) 2129.
- [5] **Kral P., Dvorak J., Sklenicka V., Horita Z., Takizawa Y., Tang Y., Kvapilova M., Svobodova M.** Effect of ultrafine-grained microstructure on creep behaviour in 304L austenitic steel, *Materials Science and Engineering A – Structural Materials Properties Microstructure and Processing*, 785 (2020) 139383.
- [6] **Fastykovskii A.R.** Region for extrolling feasibility and effective deformation modes, *Russian Journal of Non-Ferrous Metals*, 52 (3) (2011) 230–233.
- [7] **Naizabekov A., Lezhnev S., Panin E., Volokitina I., Arbus A., Koinov T., Mazur I.** Effect of Combined Rolling–ECAP on Ultrafine-Grained Structure and Properties in 6063 Al Alloy, *Journal of Materials Engineering and Performance*, 28 (1) (2019) 200–210.
- [8] **Ershov A.A., Loginov Y.N., Zagirov N.N., Ivanov E.V.** Simulation of the Con-solidation of a Porous Material in a Combined Rolling–Extrusion Process, *Metallurgist*, 60 (5–6) (2016) 561–565.
- [9] **Ghafarian Nosrati H., Khalili K., Gerdooei M.** Theoretical and Numerical Investigation of Required Torque in ECAP–Conform Process, *Metallurgical and Materials Transactions B: Process Metallurgy and Materials Processing Science*, 51(2) (2020) 519–528.
- [10] **Zhao S.L., Zhang H.M., Cui Z.S., Chen D., Chen Z.** Particle dispersion and grain refinement of in-situ TiB₂ particle reinforced 7075 Al composite processed by elliptical cross-section torsion extrusion, *Journal of Alloys and Compounds*, 834 (2020) 155136.

- [11] **Bartnicki J.** Numerical analysis of feed rate influence on hollow hub shape during rolling extrusion process, *Key Engineering Materials*, 572 (2014) 323–326.
- [12] **Chembarisova R.G., Aleksandrov I.V.** Simulation of the Elastoplastic Behavior of Grade-4 Ti in the ECAP-C Process, *Metal Science and Heat Treatment*, 58 (3-4) (2016) 236–244.
- [13] **Panin E.A., Naizabekov A.B., Volokitin A.V., Akhmetova G.E., Volokitina I.E., Tolkushkin A.O.** New concepts of severe plastic deformation combined processes. *Industry 4.0*, 7 (2) (2022) 59–61.
- [14] **Naizabekov A., Lezhnev S., Panin E., Koinov T.** Theoretical grounds of the combined “rolling – equal – channel step pressing” process. *Journal of Chemical Technology and Metallurgy*, 51 (5) (2016) 594–602.
- [15] **Voorhes W.G.** Extrusion process, USA Patent, No. 3922898 (1975).

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

ПАНИН Евгений Александрович – доцент, *Карагандинский индустриальный университет, Ph.D.*

E-mail: ye.panin@tttu.edu.kz

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6830-0630>

АХМЕТОВА Гульжайнат Есенжоловна – заведующая кафедрой “Обработка металлов давлением”, *Карагандинский индустриальный университет, Ph.D.*

E-mail: agulzhajnat@bk.ru

ВОЛОКИТИНА Ирина Евгеньевна – доцент, *Рудненский индустриальный институт, Ph.D.*

E-mail: irinka.vav@mail.ru

REFERENCES

- [1] **H. Zhao, Y. Ren, B. Yang, G. Qin,** Microstructural evolution of equal channel angular drawn purity titanium at room temperature, *Journal of Alloys and Compounds*, 811 (2019) 152002.
- [2] **N. Kumar,** Severe Plastic Deformation of Al–Mg–Si Alloys Processed Through Rolling Techniques: A Review, *Metallography, Microstructure, and Analysis*, 11 (3) (2022) 353–404.
- [3] **T.G. Langdon,** A Lifetime of Research in Creep, Superplasticity, and Ultrafine-Grained Materials, *Advanced Engineering Materials*, 22 (1) (2020) 1900442.
- [4] **Z.-R. Wang, P.-Z. Si, J. Park, C.-J. Choi, H.-L. Ge,** A Review of Ultrafine-Grained Magnetic Materials Prepared by Using High-Pressure Torsion Method, *Materials*, 15 (6) (2022) 2129.
- [5] **P. Kral, J. Dvorak, V. Sklenicka, Z. Horita, Y. Takizawa, Y. Tang, M. Kvapilova, M. Svobodova,** Effect of ultrafine-grained microstructure on creep behaviour in 304L austenitic steel, *Materials Science and Engineering A – Structural Materials Properties Microstructure and Processing*, 785 (2020) 139383.
- [6] **A.R. Fastyskovskii,** Region for extruding feasibility and effective deformation modes, *Russian Journal of Non-Ferrous Metals*, 52 (3) (2011) 230–233.
- [7] **A. Naizabekov, S. Lezhnev, E. Panin, I. Volokitina, A. Arbuz, T. Koinov, I. Mazur,** Effect of Combined Rolling–ECAP on Ultrafine-Grained Structure and Properties in 6063 Al Alloy, *Journal of Materials Engineering and Performance*, 28 (1) (2019) 200–210.
- [8] **A.A. Ershov, Y.N. Loginov, N.N. Zagirov, E.V. Ivanov,** Simulation of the Con-solidation of a Porous Material in a Combined Rolling-Extrusion Process, *Metallurgist*, 60 (5-6) (2016) 561–565.
- [9] **H. Ghaforian Nosrati, K. Khalili, M. Gerdooei,** Theoretical and Numerical Investigation of Required Torque in ECAP-Conform Process, *Metallurgical and Materials Transactions B: Process Metallurgy and Materials Processing Science*, 51 (2) (2020) 519–528.

- [10] S.L. Zhao, H.M. Zhang, Z.S. Cui, D. Chen, Z. Chen, Particle dispersion and grain refinement of in-situ TiB₂ particle reinforced 7075 Al composite processed by elliptical cross-section torsion extrusion, *Journal of Alloys and Compounds*, 834 (2020) 155136.
- [11] J. Bartnicki, Numerical analysis of feed rate influence on hollow hub shape during rolling extrusion process, *Key Engineering Materials*, 572 (2014) 323–326.
- [12] R.G. Chembarisova, I.V. Aleksandrov, Simulation of the Elastoplastic Behavior of Grade-4 Ti in the ECAP-C Process, *Metal Science and Heat Treatment*, 58 (3-4) (2016) 236–244.
- [13] E.A. Panin, A.B. Naizabekov, A.V. Volokitin, G.E. Akhmetova, I.E. Volokitina, A.O. Tolkushkin, New concepts of severe plastic deformation combined processes. *Industry 4.0*, 7 (2) (2022) 59–61.
- [14] A. Naizabekov, S. Lezhnev, E. Panin, T. Koinov, Theoretical grounds of the combined “rolling – equal – channel step pressing” process. *Journal of Chemical Technology and Metallurgy*, 51 (5) (2016) 594–602.
- [15] W.G. Voorhes, Extrusion process, USA Patent, No. 3922898 (1975).

INFORMATION ABOUT AUTHORS

Evgeniy A. PANIN – *Karaganda Industrial University.*

E-mail: ye.panin@tttu.edu.kz

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6830-0630>

Gulzhainat E. AKHMETOVA – *Karaganda Industrial University.*

E-mail: agulzhajnat@bk.ru

Irina E. VOLOKITINA – *Rudny Industrial Institute.*

E-mail: irinka.vav@mail.ru

Поступила: 09.01.2023; Одобрена: 09.02.2023; Принята: 15.02.2023.

Submitted: 09.01.2023; Approved: 09.02.2023; Accepted: 15.02.2023.