

**МАШИНОСТРОЕНИЕ, МЕХАНИКА**  
**MECHANICAL ENGINEERING, MECHANICS**

УДК 621.77:539.375  
<https://doi.org/10.29235/1561-8358-2022-67-4-370-378>

Поступила в редакцию 17.08.2022  
Received 17.08.2022

**Г. В. Кожевникова<sup>1</sup>, В. Я. Щукин<sup>2</sup>, С. С. Дубенец<sup>1</sup>**

<sup>1</sup>*Физико-технический институт Национальной академии наук Беларуси, Минск, Республика Беларусь*  
<sup>2</sup>*Белорусский национальный технический университет, Минск, Республика Беларусь*

**КРИТЕРИИ ВСКРЫТИЯ ОСЕВОЙ ПОЛОСТИ  
ПРИ ПОПЕРЕЧНО-КЛИНОВОЙ ПРОКАТКЕ**

**Аннотация.** Рассмотрено применение эмпирической, феноменологической деформационной и энергетической теорий разрушения металла по отношению к процессу поперечно-клиновой прокатки. Отличительной особенностью поперечно-клиновой прокатки по сравнению с другими процессами обработки металлов давлением является сложное напряженно-деформированное состояние в очаге деформации и возможность вскрытия осевой полости. Приведены существующие эмпирические критерии разрушения. Рассмотрены схема нового калибровочного испытания на основе поперечно-клиновой прокатки и критерий разрушения, предложенные Збигневом Патером. Показано, что эмпирический критерий разрушения Збигнева Патера обеспечивает корректное определение момента вскрытия полости при поперечно-клиновой прокатке. Показано, что согласно феноменологической деформационной теории, разработанной В. Л. Колмогоровым, разрушение металла при пластической деформации наступает после достижения накопленными деформациями своего предельного значения, которое зависит от среднего напряжения. При этом зависимость предельного значения накопленных деформаций от напряжения носит более сложный характер. Предлагается оценивать пластичность металла в зависимости от напряженного состояния в виде двух независимых инвариантов тензора напряжений: среднего напряжения и параметра третьего инварианта тензора напряжений. Зависимость предельной величины накопленной деформации, при которой происходит разрушение, от напряженного состояния строится в виде поверхности пластичности. Феноменологический деформационный критерий разрушения металла при пластических деформациях позволяет определить момент вскрытия полости при поперечно-клиновой прокатке и ресурс пластичности металла.

**Ключевые слова:** пластическое деформирование, критерии разрушения, напряженно-деформированное состояние, пластичность, ресурс пластичности

**Для цитирования:** Кожевникова, Г. В. Критерии вскрытия осевой полости при поперечно-клиновой прокатке / Г. В. Кожевникова, В. Я. Щукин, С. С. Дубенец // Вес. Нац. акад. навук Беларусі. Сер. фіз.-тэхн. навук. – 2022. – Т. 67, № 4. – С. 370–378. <https://doi.org/10.29235/1561-8358-2022-67-4-370-378>

**Grazhina V. Kozhevnikova<sup>1</sup>, Valery Ya. Shchukin<sup>2</sup>, Stanislav S. Dubianets<sup>1</sup>**

<sup>1</sup>*Physical-Technical Institute of the National Academy of Sciences of Belarus, Minsk, Republic of Belarus*  
<sup>2</sup>*Belarusian National Technical University, Minsk, Republic of Belarus*

**CRITERIA FOR OPENING AN AXIAL CAVITY IN CROSS-WEDGE ROLLING**

**Abstract.** The application of empirical, phenomenological deformation and energy theories of metal fracture in relation to the process of cross-wedge rolling is considered. A distinctive feature of cross-wedge rolling in comparison with other metal pressure treatment processes is the complex stress-strain state in the deformation focus and the possibility of opening the axial cavity. The existing empirical criteria of destruction are given. The scheme of a new calibration test based on cross-wedge rolling and the fracture criterion proposed by Zbigniew Pater are considered. It is shown that the Zbigniew Pater's empirical criterion for the destruction of Zbigniew Pater provides a correct determination of the moment of opening the cavity during cross-wedge rolling. The improved phenomenological deformation theory is based on the theory of fracture developed by V. L. Kolmogorov. It is proposed to evaluate the plasticity of the metal depending on the stress state in the form of two independent invariants of the stress tensor: the average stress and the parameter of the third invariant of the stress tensor. The dependence of the limit value of accumulated deformation, at which destruction occurs, on the stress state is constructed in the form of a plasticity surface. The phenomenological deformation criterion of metal destruction during plastic deformations allows us to determine the moment of opening the cavity during cross-wedge rolling and the plasticity resource of the metal.

**Keywords:** plastic straining, failure criteria, stress-strain state, plasticity, plasticity resource

**For citation:** Kozhevnikova G. V., Shchukin V. Ya., Dubianets S. S. Criteria for opening an axial cavity in cross-wedge rolling. *Vestsi Natsyonal'най akademii navuk Belarusi. Seryya fizika-technichnykh navuk = Proceedings of the National Academy of Sciences of Belarus. Physical-technical series*, 2022, vol. 67, no. 4, pp. 370–378 (in Russian). <https://doi.org/10.29235/1561-8358-2022-67-4-370-378>

**Введение.** В настоящее время при изготовлении валов и осей в условиях массового и крупносерийного производства используются разнообразные способы обработки металлов давлением, которые придают изделиям повышенные механические свойства, обеспечивают высокую производительность труда и экономное использование металла. Особое место среди них занимает поперечно-клиноватая прокатка (ПКП). От других процессов ее выгодно отличает высокий коэффициент использования металла, возможность полной автоматизации процесса, максимальное приближение прокатанной детали к профилю изделия, широкие технологические возможности, высокая стойкость инструмента, низкий уровень шума, отсутствие источников виброколебаний. По экономичности ПКП превосходит штамповку на молотах, прессах, ковочных машинах. В металлообрабатывающей промышленности базирующиеся на использовании метода ПКП технологии используются для производства промежуточных профилированных заготовок под последующую точную штамповку или иные процессы пластического формообразования, а также под чистовую механическую обработку. ПКП используется в автомобильной промышленности, тракторо- и сельхозмашиностроении, станкостроении, горном, дорожном, строительном производствах, приборостроении, энергетическом машиностроении, при производстве бытовой техники, в оборонной промышленности, железнодорожном машиностроении, авиастроении и атомной промышленности.

Основной задачей изучения процессов обработки металлов давлением, как правило, является исследование их кинематики, динамики, изменения свойств материала при пластическом течении и прежде всего – пластических свойств, то есть способности материала изменять свою форму без разрушения. Пластическому разрушению металла всегда предшествуют его пластическая деформация. В исходном состоянии в металле, как правило, присутствуют некоторое количество дислокаций, микротрещин, неметаллических включений и иные дефекты. При пластической деформации происходит рост количества дислокаций, в итоге увеличивается их плотность. При этом вновь образовавшиеся микротрещины и микропоры увеличиваются в размерах. По мере накопления деформаций микропоры и микротрещины, объединяясь, трансформируются в макропоры и макротрещины. На заключительной стадии деформации макропоры и макротрещины перерастают в одну большую макрополость, или макротрещину, что окончательно разрушает материал.

Отличительной особенностью ПКП по сравнению с другими процессами обработки металлов давлением является сложное напряженно-деформированное состояние в очаге деформации [1]. В области контакта заготовки с инструментом наблюдаются сжимающие напряжения и значительные накопленные деформации, в свою очередь в осевой области заготовки отмечаются растягивающее гидростатическое давление и значительные знакопеременные деформации, которые могут привести к разрушению металла в виде осевого вскрытия полости, известного как эффект Маннесмана. В других областях (между контактом и осью заготовки) гидростатическое давление приближается к нулю и накопленные деформации меньше, чем в двух указанных зонах. Указанные ограничения преодолеваются корректным выбором параметров углов инструмента, степени обжатия и температуры прокатки. Геометрия инструмента определяется углом заострения клина  $\beta$  (от  $0,5^\circ$  до  $12^\circ$ ) и углом наклона боковой грани  $\alpha$  (от  $25^\circ$  до  $45^\circ$ ). Угол  $\beta$  определяет скорость распространения очага деформации вдоль оси заготовки, угол  $\alpha$  – площадь контакта заготовки с инструментом и соответственно размеры очага деформации. Заходный участок клина и отрезной нож задаются углом подъема  $\gamma$ .

Вероятность вскрытия осевой полости при ПКП сдерживает широкое применение этого вида прокатки в промышленности. По этой причине большое внимание уделяется изучению процесса разрушения металла при пластических деформациях [2–4].

**Теории разрушения металла.** В теории обработки металлов давлением существует раздел, изучающий разрушение металла при пластических деформациях, который в свою очередь делится на два направления: эмпирическую теорию и феноменологическую деформационную теорию. Третье направление – энергетическую теорию – начинает развивать Белорусская школа поперечной прокатки [5]. Деформационный, энергетический и эмпирический критерии разрушения металлов при пластическом деформировании не противоречат друг другу, но феноменологический деформационный критерий до последнего времени считался наиболее универсальным [1].

Существующие энергетические критерии построены на предположении, что разрушение наступает после совершения определенной работы для конкретного материала. Для зарождения трещины, ее роста и объединения в макрополость необходимо совершить работу, которая постоянна для конкретного материала при стабильной температуре. Существующие энергетические критерии разрушения при пластическом течении имеют ограниченное применение в рамках какого-то одного метода испытания пластических свойств, например растяжения, или растяжения с концентраторами, или поперечной прокатки. В связи с этим данная (энергетическая) теория менее точна и характеризуется ограниченной областью применения. Существующие энергетические теории не учитывают весь тензор напряжений, а только его часть. Для расчета совершенной работы используется произведение только одной из компонент тензора напряжений на накопленную деформацию.

Эмпирическая теория разрушения металла при пластических деформациях предполагает экспериментальное определение зависимости разрушения от параметров процесса. Недостаток этого направления – необходимость постановки эксперимента и требование, с одной стороны, не пропустить все факторы, влияющие на процессы разрушения, а с другой – диапазон экспериментов должен перекрывать диапазон параметров процесса [6].

Феноменологический подход к явлению пластического разрушения металлов – это и не фундаментальная теория, и не эксперимент, хотя он создается с участием эксперимента, поэтому результаты не могут быть описаны научными теориями. Феноменологическая теория определяет взаимосвязь между различными наблюдаемыми явлениями в соответствии с фундаментальной теорией, но непосредственно из этой теории не вытекающими. Теория строится на том, что всякому разрушению должна предшествовать деформация до критической величины. Эта критическая величина деформации в значительной степени зависит от напряженного состояния. На критическую величину деформации оказывает влияние температура деформации, скорость деформации, характер деформации (монотонная и немонотонная) и нелинейность накопления деформации [7].

Обладая информацией о функциональной зависимости критической величины деформации от напряженного состояния в очаге деформации, методом компьютерного моделирования можно просчитать, какой процент пластических свойств металла был израсходован при ПКП. Достижение 100 % означает вскрытие осевой полости. Изменяя геометрию клинового инструмента, расчетным путем возможно оптимизировать его параметры, добиваясь снижения вероятности вскрытия осевой полости. К сожалению, указанная информация, как правило, отсутствует в литературе, и на помощь в этом случае приходит экспериментальный метод определения остаточных пластических свойств в прокатанных поковках, то есть ресурса пластичности.

**Критерий разрушения по Збигневу Патеру.** Эмпирическая теория разрушения при ПКП хорошо освещена в трудах ученых Люблинского университета технологий под руководством профессора Збигнева Патера [4].

Критерий разрушения по Збигневу Патеру  $f_{\text{PATER}}$  [4] записывается следующим образом:

$$f_{\text{PATER}} = \int_0^{\varepsilon_f} \left[ (1 - \Phi) \frac{\sqrt{3}}{2} \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{\sigma_i} + \Phi \frac{\sigma_1}{\sigma_i} \right] d\varepsilon, \quad (1)$$

где  $\varepsilon$  – деформация, эквивалентная относительной деформации при растяжении образца в среднем сечении ( $\varepsilon = \Delta l/l$ , здесь  $l$  – длина заготовки,  $\Delta l$  – абсолютное изменение длины);  $\varepsilon_f$  – деформация, при которой происходит разрушение;  $\sigma_1$  – максимальное главное напряжение;  $\sigma_3$  – минимальное главное напряжение;  $\sigma_i$  – эффективное напряжение;  $\Phi$  – функция, описывающая взаимосвязь между напряжением и образованием пустот, их ростом и слиянием:  $\Phi = 0$  при  $\eta \leq 0$ ;  $\Phi = 3\eta$  при  $0 < \eta \leq 0,333$ ;  $\Phi = 1$  при  $\eta > 0,333$  ( $\eta$  – среднее напряжение).

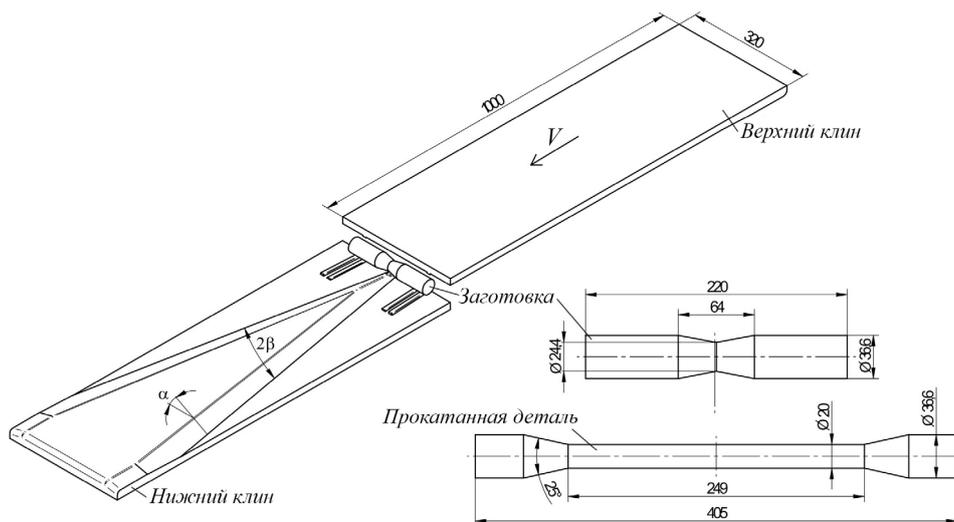


Рис. 1. Схема нового калибровочного испытания на основе поперечно-клиновой прокатки, размеры даны в мм [4]  
 Fig. 1. Schema of a new calibration test based on cross wedge rolling, dimensions in mm [4]

Схема эксперимента по определению пластичности металла по данному критерию показана на рис. 1.

Экспериментально исследовалась пластичность стали 42CrMo4, химический состав которой представлен в таблице.

**Химический состав стали 42CrMo4 по EN 10083-2006**  
**Chemical composition of steel 42CrMo4 according to EN 10083-2006**

C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	Fe
0,38–0,45	< 0,4	0,6–0,9	< 0,025	< 0,025	0,9–1,2	0,15–0,30	Остальное

Образцы (см. рис. 1) прокатывались при температурах нагрева 900, 1000, 1100 °С со скоростью инструмента  $V = 300$  мм/с, степень обжатия при прокатке  $\delta$  изменялась плавно от 1,22 до 1,83, углы клинового инструмента задавались следующими: угол заострения клинового инструмента  $\beta = 9^\circ$ , угол наклона боковой грани клинового инструмента  $\alpha$  плавно изменяли от  $21,4^\circ$  до  $12,5^\circ$ . Наличие полости определяли на рентгеновских снимках (рис. 2).

Компьютерным моделированием определялись параметры ПКП за все время прокатки и среди этих данных выделяли значение  $C_i$  для точки  $X_C$  (см. рис. 2). Это значение соответствовало критическому, при котором образовывалась полость. Часть заготовки слева от значения  $X_C$  – это то, что превышало 100 % вскрытия полости, часть заготовки справа от  $X_C$  имела запас пластичности до вскрытия полости.

Затем результаты эксперимента рассчитывались по различным критериям.

Критерий *Rice, Tracey* [8]:

$$f_{RT} = \int_0^\epsilon \exp\left(\frac{2}{3}\eta\right) d\epsilon. \quad (2)$$

Критерий *Ko et al.* [9]:

$$f_{KO} = \int_0^\epsilon \frac{\sigma_1}{\sigma_i} ((1 + 3\eta)) d\epsilon. \quad (3)$$

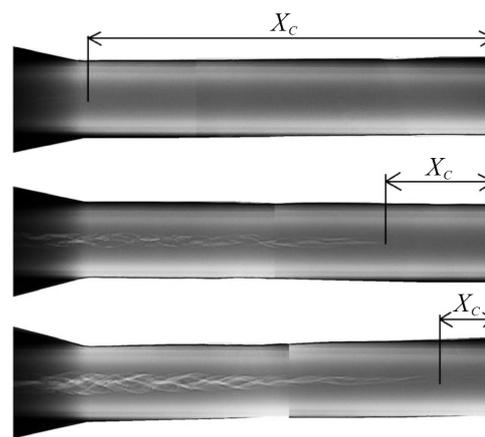


Рис. 2. Рентгеновские снимки образцов стали 42CrMo4, прокатанных из заготовок, предварительно нагретых до (сверху вниз) 1100, 1000 и 900 °С [4]

Fig. 2. Radiograms of 42CrMo4 steel specimens rolled from billets preheated to (from top to bottom) 1100, 1000 and 900 °C [4]

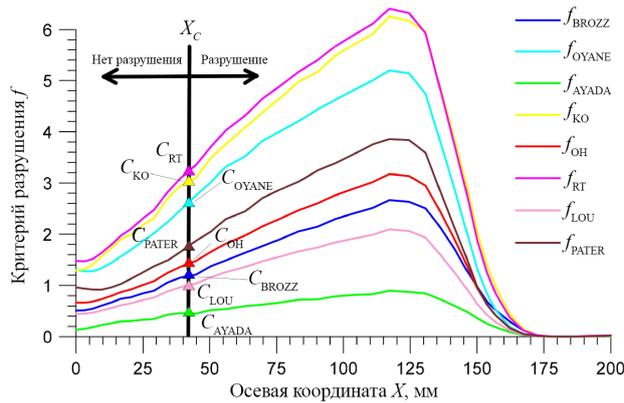


Рис. 3. Безразмерные функции поврежденности в осевой зоне образца при испытании методом поперечно-клиновой прокатки при 1000 °С (осевая координата  $X = 0$  мм обозначает плоскость симметрии) [4]

Fig. 3. Dimensionless damage functions in the axial zone of the sample when tested on the basis of cross-wedge rolling at 1000 °C (the axial coordinate  $X = 0$  mm denotes symmetry plane) [4]

Критерий *Oyane* [10]:

$$f_{OYANE} = \int_0^\varepsilon (1 + A\eta) d\varepsilon, \tag{4}$$

где  $A$  – константа материала.

Критерий *Oh et al.* [11]:

$$f_{OH} = \int_0^\varepsilon \frac{\sigma_1}{\sigma_i} d\varepsilon. \tag{5}$$

Критерий *Brozzo et al.* [12]:

$$f_{BROZZO} = \int_0^\varepsilon \frac{2\sigma_1}{3(\sigma_i - \sigma_m)} d\varepsilon. \tag{6}$$

Критерий *Lou et al.* [13]:

$$f_{LOU} = \int_0^\varepsilon \left( \frac{\tau_{\max}}{\sigma_i} \right)^{c_1} \left( \frac{\langle 1 + 3\eta \rangle}{2} \right)^{c_2} d\varepsilon, \tag{7}$$

где  $\tau_{\max}$  – максимальное напряжение сдвига.

Критерий *Ayada et al.* [14]:

$$f_{AYADA} = \int_0^\varepsilon \eta d\varepsilon. \tag{8}$$

Результаты эксперимента, рассчитанные по критериям (1)–(8), показаны на рис. 3.

Критерии (1)–(8) квалифицируются как эмпирические, так как они не отражают зависимости разрушения металла от параметров ПКП, влияющих на разрушение: напряженное состояние ( $\sigma/K$ ;  $\sqrt[3]{J_3(D_\sigma)}/K$ ), вид деформации, скорость деформации. Во всех критериях (1)–(8) тензор напряжений (а это шесть компонент тензора и дополнительно его ориентация относительно очага деформации) заменяется отдельными компонентами тензора напряжений:  $\sigma_1$  и  $\sigma_3$ . Подобная замена не противоречит эмпирической теории разрушения, которая допускает устанавливать зависимость разрушения от любых выбранных параметров процесса. Точность каждого эмпирического критерия (1)–(8) будет зависеть, кроме всего прочего, от марки материала, поэтому данный фактор должен оцениваться при проведении экспериментов.

Исходя из предположения, что разрушение металла  $w_i$  линейно связано с критерием разрушения  $C_i$ , Збигнев Патер определил его значение по формуле

$$w_i = 100\% \frac{f}{C_i}. \tag{9}$$

Доказательство закономерности (9) в [4, 15] не приводится.

Условия обозначения в формулах (1)–(8) отличаются от применяемых в Беларуси, поэтому следует иметь в виду следующее:

$$\eta = \frac{\sigma_m}{\sigma_i} = \frac{\sigma}{K}; \quad (10)$$

$$\Theta = 1 - \frac{2}{\pi} \arccos \left[ \left( \frac{r}{\sigma_i} \right)^3 \right] = 1 - \frac{2}{\pi} \arccos \frac{I_3(D_\sigma)}{K^3} \cdot 13,5; \quad (11)$$

$$r = \left[ \frac{27}{2} (\sigma_1 - \sigma)(\sigma_2 - \sigma)(\sigma_3 - \sigma) \right]^{\frac{1}{3}} = 2,38 \cdot \sqrt[3]{I_3(D_\sigma)}, \quad (12)$$

где  $\sigma_m = \sigma$  – среднее напряжение;  $\Theta$  – параметр угла Лоде;  $r$  – корень кубический из третьего инварианта девиатора напряжений;  $I_3(D_\sigma)$  – третий инвариант девиатора напряжений;  $K$  – пластическая постоянная материала.

Зависимость (9) показывает, что описанный экспериментальный метод определения (см. рис. 2, 3) дает достоверную информацию только для одного значения  $X_C$ , когда параметры ПКП просчитаны на компьютере и эксперимент показал момент вскрытия полости  $C_i$ . Исследователей в значительно большей степени интересуют моменты прокатки до вскрытия полости, то есть для случая  $X < X_C$ . В этой области эксперимент дает недостоверный результат по следующим причинам.

1. В области  $X < X_C$  в эксперименте считается, что все значения критерия разрушения равны  $C = C_i$ . Реально это не выполняется, потому что в данной области прокатка проходит со степенью обжатия  $\delta < \delta_C$  и углом наклона боковой грани  $\alpha < \alpha_C$ . Несомненно, что выбор других параметров прокатки  $\delta$  и  $\alpha$  приводят к изменению значений критериев разрушения  $C$  и  $w_i$ .

2. Нами показано [7, 16], что на разрушение оказывают влияние два параметра напряженного состояния – скорость деформации (в большей степени для цветных сплавов) и вид деформации: монотонная однонаправленная, немонотонная однонаправленная и немонотонная разнонаправленная. Эмпирический критерий (1) эти закономерности не учитывает.

**Критерий разрушения деформационной феноменологической теории.** Усовершенствованная феноменологическая деформационная теория [7] строится на базе разработанной В. Л. Колмогоровым [17] теории разрушения. Согласно феноменологической деформационной теории разрушение металла при пластической деформации наступает после достижения накопленными деформациями своего предельного значения  $\Lambda_{пр}$ . Это предельное значение зависит от среднего напряжения  $\sigma/K$ , и эта зависимость названа диаграммой пластичности. Предельное значение накопленных деформаций  $\Lambda_{пр}$  также зависит от температуры и скорости деформации. Повреждаемость металла нелинейно связана с накопленными деформациями. Авторами в значительной степени развита теория В. Л. Колмогорова и показана зависимость показателя нелинейности накопления повреждаемости от напряженного состояния и его порогового значения. Показано [7], что зависимость предельного значения накопленных деформаций  $\Lambda_{пр}$  от напряжений носит более сложный характер: она представляет собой поверхность пластичности. Впервые предлагается оценивать пластичность металла в зависимости от напряженного состояния в виде двух независимых инвариантов тензора напряжений: среднего напряжения и параметра третьего инварианта тензора напряжений. Зависимость предельной величины накопленной деформации  $\Lambda_{пр}$ , при которой происходит разрушение, от напряженного состояния, строится в виде поверхности пластичности 1–2–3–4 (рис. 4):

$$\Lambda_{пр} = f(\sigma/K; \sqrt[3]{J_3(T_\sigma)} / K), \quad (13)$$

где  $\sigma/K$  – среднее напряжение;  $\sigma$  – среднее нормальное напряжение, Па;  $K$  – пластическая постоянная материала, Па;  $\sqrt[3]{J_3(T_\sigma)} / K$  – параметр третьего инварианта тензора напряжений;  $J_3(T_\sigma)$  – третий инвариант тензора напряжений, Па<sup>3</sup>.

Использование в выражении (13) первого  $J_1(T_\sigma)$  и третьего  $J_3(T_\sigma)$  инвариантов тензора напряжений определяет их взаимную независимость, а деление на  $K$  позволяет сравнивать между собой пластичность различных материалов.

Согласно феноменологической деформационной теории разрушения металла, при пластических деформациях напряженное состояние описывается тензором напряжений в главных осях тремя параметрами  $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$ , в этом случае три касательных напряжения равны нулю. Из трех

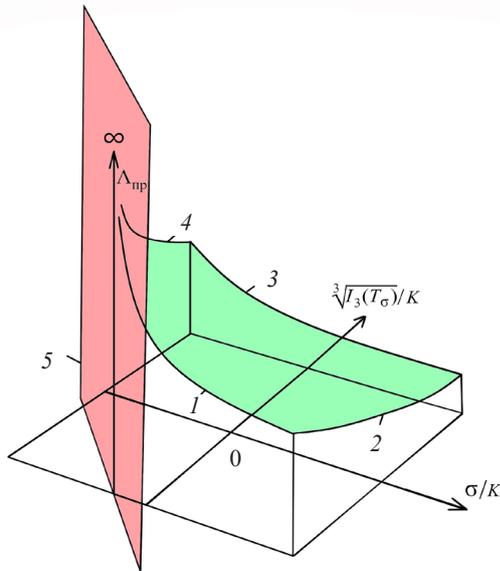


Рис. 4. Зависимость предельной степени деформации сдвига  $\Lambda_{пр}$  от параметров напряженного состояния: среднего напряжения  $\sigma/K$  и параметра третьего инварианта тензора напряжений  $\sqrt[3]{J_3(T_\sigma)}/K$ ; 1–2–3–4 – поверхность пластичности [16]  
 Fig. 4. Dependence of the limiting degree of shear deformation  $\Lambda_{пр}$  on the parameters of the stress state: the average stress  $\sigma/K$  and the parameter of the third invariant of the stress tensor  $\sqrt[3]{J_3(T_\sigma)}/K$ ; 1–2–3–4 – plasticity surface [16]

главных нормальных напряжений независимыми являются только два, так как третье главное нормальное напряжение связано с остальными двумя условием пластичности Мизеса

$$K = +\sqrt{\frac{1}{6}[(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2]}. \quad (14)$$

Поэтому зависимость накопленной до разрушения деформации при условии несжимаемости материала равна

$$\Lambda_{пр} = +\sqrt{\frac{1}{6}[(\varepsilon_1 - \varepsilon_2)^2 + (\varepsilon_2 - \varepsilon_3)^2 + (\varepsilon_3 - \varepsilon_1)^2]}. \quad (15)$$

Критерий разрушения в данной теории разрушения записывается в виде:

$$\Lambda = \int_0^t H dt = \Lambda_{пр}, \quad (16)$$

где  $H$  – интенсивность скоростей деформации сдвига,  $c^{-1}$ ;  $t$  – время, с.

Закономерность (16) представлена на рис. 4 поверхности 1–2–3–4 предельных значений степени деформации сдвига  $\Lambda_{пр}$ . Отметим закономерность: кривые 1 и 3 – это диаграммы пластичности феноменологической деформационной теории В. Л. Колмогорова [17]. Данное обстоятельство подчеркивает, что усовершенствованная авторами настоящей статьи теория разрушения является развитием известной теории В. Л. Колмогорова.

Наиболее простой аппроксимирующей функцией кривых поверхности пластичности является

$$\Lambda_{пр} = \frac{A}{1 + B(\sigma/K)_\infty}. \quad (17)$$

Для экспериментального определения зависимости (17) достаточно двух испытаний с различными напряжениями, что сокращает количество экспериментов для построения поверхности пластичности. При  $(\sigma/K)_\infty = -\frac{1}{B}$  предельная степень деформации сдвига стремится к бесконечности  $\Lambda_{пр} = \infty$ , то есть разрушение материала невозможно, при этом наблюдается (в том числе экспериментально) эффект неограниченной пластичности – область 5 на рис. 4.

Наличие в феноменологической деформационной теории трех видов деформации с различными уровнями предельной степени деформации сдвига является следствием зависимости уровня повреждаемости металла от возможного направления линий дислокаций. Математически эта зависимость записывается следующим образом:

$$\Lambda_i^{\Omega_1} = \Lambda_{i+1}; \quad (18)$$

$$\Lambda_{i+1}^{\Omega_2} = \Lambda_{i+2}. \quad (19)$$

Здесь  $\Lambda_i^{\Omega_1}$ ,  $\Lambda_{i+1}^{\Omega_2}$ ,  $\Lambda_{i+2}$  – предельные степени деформации сдвига видов, где  $\Omega_1 > \Omega_2 > 1$ .

Поскольку количественная величина пластичности материала зависит от вида деформации, методы экспериментального определения пластичности также следует разделить на ряд подгрупп в соответствии с видами деформации: однонаправленная монотонная, разнонаправленная монотонная и разнонаправленная немонотонная.

*Однонаправленная монотонная деформация:* кручение цилиндрической заготовки или трубы в одном направлении; сдвиг образца в одном направлении; метод ЕСАР с однократным продавливанием образца; растяжение листового крестообразного образца (3D); гибка листа.

*Разнааправленая монатонная дэфармацыя:* растяжэнне цыліндрычнага образца без абразавання шэйкі; асадка цыліндрычнага образца без абразавання бочки; растяжэнне ліста без абразавання шэйкі; сдвиг образца в одной плоскости по двум взаимно перпендикулярным направлениям; растяжэнне цыліндрычнага образца с адначасным кручэннем без абразавання шэйкі; асадка цыліндрычнага образца с адначасным кручэннем без абразавання бочки.

*Разнааправленая немонатонная дэфармацыя:* кручэнне цыліндрычнага образца или трубы в режиме с изменением знака деформации на противоположный; метод ЕСАР с изменением знака деформации на противоположный; растяжэнне цыліндрычнага образца с канцэнтратаром; растяжэнне ліста с канцэнтратаром; папярэчная прокатка при плоско-деформированном состоянии (2D); папярэчная прокатка дыскообразнага образца (3D), – методы испытання пластычнасці металлов, при которых могут использоваться знакопеременные деформации, изменяется напряженное состояние вдоль линии тока.

В феноменологической деформационной теории ресурс пластичности  $\lambda$  (остаточная пластичность) определяется для первого вида деформации по формуле

$$\lambda = \left( 1 - \frac{\Lambda}{\Lambda_{\text{пр}}} \right) \cdot 100\% \quad (20)$$

и является постоянной величиной с изменением параметров деформирования.

**Заклучение.** Таким образом, установлено, что эмпирический критерий разрушения Збигнева Патера обеспечивает корректное определение момента вскрытия полости при ПКП. Феноменологический деформационный критерий разрушения металла при пластических деформациях дает возможность установить момент вскрытия полости при ПКП и ресурс пластичности металла.

Полученный результат показывает области применения эмпирических и феноменологического деформационного критериев разрушения металла применительно к процессу ПКП и позволяет обоснованно выбирать критерий разрушения в зависимости от задач, стоящих перед исследователем.

#### Список использованных источников

1. Щукин, В. Я. Белорусская школа поперечно-клиновой прокатки / В. Я. Щукин, Г. В. Кожевникова // Вест. Нац. акад. наук Беларусі. Сер. фіз.-тэхн. навук. – 2016. – № 1. – С. 43–50.
2. A study on central crack formation in cross wedge rolling / Xianyan Zhoua [et al.] // J. Mater. Process. Tech. – 2020. – Vol. 279. – Art. ID 116449. <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2019.116549>
3. Cuiping Yang. Micro-mechanism of central damage formation during cross wedge rolling / Cuiping Yang, H. Dong, Zhenghuan Hu // J. Mater. Process. Technol. – 2018. – Vol. 252. – P. 322–332. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2017.09.041>
4. Pater, Z. Establishment of a new hybrid fracture criterion for cross wedge rolling / Z. Pater, J. Tomczak, T. Bulzak // Int. J. Mech. Sci. – 2020. – Vol. 167. – Art. ID e105274. <https://doi.org/10.1016/j.jmesci.2019.105274>
5. Кожевникова, Г. В. Развитие энергетической теории разрушения при пластической деформации металла / Г. В. Кожевникова, С. С. Дубенец // Актуальные проблемы прочности / А. В. Алифанов [и др.]; под ред. В. В. Рубаника. – Минск: УП «ИВЦ Минфина», 2022. – Гл. 13. – С. 160–172.
6. Cross wedge rolling of a Ti6Al4V (ELI) alloy: the experimental studies and the finite element simulation of the deformation and failure / M. Çakırcalı [et al.] // Int. J. Adv. Manuf. Technol. – 2013. – Vol. 65, iss. 9–12. – P. 1273–1287. <https://doi.org/10.1007/s00170-012-4256-3>
7. Кожевникова, Г. В. Деформационный критерий разрушения при пластическом течении / Г. В. Кожевникова // Вест. Нац. акад. наук Беларусі. Сер. фіз.-тэхн. навук. – 2010. – № 2. – С. 61–68.
8. Rice, J. R. On the ductile enlargement of voids in triaxial stress fields / J. R. Rice, D. M. Tracey // J. Mech. Phys. Solids. – 1969. – Vol. 17, iss. 3. – P. 201–217. [https://doi.org/10.1016/0022-5096\(69\)90033-7](https://doi.org/10.1016/0022-5096(69)90033-7)
9. Prediction of fracture in hub-hole expanding process using a new ductile fracture criterion / Y. K. Ko [et al.] // J. Mater. Process. TechnOL. – 2007. – Vol. 187–188. – P. 358–362. <http://dx.doi.org/10.1016%2Fj.jmatprotec.2006.11.071>
10. Oyane, M. Criteria of Ductile Fracture Strain / M. Oyane // Bull. of JSME. – 1972. – Vol. 15, iss. 90. – P. 1507–1513. <https://doi.org/10.1299/jsme1958.15.1507>
11. Oh, S. I. Ductile fracture in axisymmetric extrusion and drawing. Part II. Workability in extrusion and drawing / S. I. Oh, C. C. Chen, S. Kobayashi // J. Eng. Ind. – 1979. – Vol. 101, iss. 1. – P. 36–44. <https://doi.org/10.1115/1.3439471>
12. Brozzo, P. A new method for the prediction of formability limits in metal sheets / P. Brozzo, B. Deluca, R. Rendina // Sheet metal forming and formability: 7<sup>th</sup> Biennial Congress of the International Deep Drawing Research Group' 72: [Proceedings] : Amsterdam, October 9–13, 1972. – [Amsterdam, 1972].
13. Application of ductile fracture criteria in spin-forming and tube-bending processes / M. Zhan [et al.] // Comp. Mater. Sci. – 2009. – Vol. 47, iss. 2. – P. 353–365. <http://dx.doi.org/10.1016%2Fj.commatsci.2009.08.011>
14. Ayada, M. Central bursting in extrusion of inhomogeneous materials / M. Ayada, T. Higashino, K. Mori // Proc. of the First Intern. Conf. on Technology of Plasticity, Tokyo, Japan, 3–7 September 1984. – P. 553–558.
15. Determination of the Critical Value of Material Damage in a Cross Wedge Rolling Test / Z. Pater [et al.] // Materials. – 2021. – Vol 14, № e1586. – P. 1–18. <http://dx.doi.org/10.3390/ma14071586>

16. Кожевникова, Г. В. Пластические свойства металлов и сплавов: феноменологическая деформационная теория разрушения при пластическом течении / Г. В. Кожевникова, В. Я. Щукин. – Минск: Беларус. навука, 2021. – 277 с.
17. Пластичность и разрушение / под общ. ред. В. Л. Колмогорова. – М.: Металлургия, 1977. – 336 с.

## References

1. Shchukin V. Ya., Kozhevnikova G. V. Belarusian cross-wedge rolling school of thought. *Vestsi Natsyyanal'nai akademii navuk Belarusi. Seryya fizika-technichnykh navuk = Proceedings of the National Academy of Sciences of Belarus. Physical-technical series*, 2016, no. 1, pp. 43–50 (in Russian).
2. Xianyan Zhoua, Zhutao Shaoa, Pruncua C. I., Lin Huab, Balinta D., Jianguo Lina, Jun Jianga. A study on central crack formation in cross wedge rolling. *Journal of Materials Processing Technology*, 2020, vol. 279, art. ID 116449. <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2019.116549>
3. Cuiping Yang, Dong H., Zhenghuan Hu. Micro-mechanism of central damage formation during cross wedge rolling. *Journal of Materials Processing Technology*, 2018, vol. 252, pp. 322–332. <http://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2017.09.041>
4. Pater Z., Tomczak J., Bulzak T. Establishment of a new hybrid fracture criterion for cross wedge rolling. *International Journal of Mechanical Sciences*, 2020, vol. 167, art. ID e105274. <https://doi.org/10.1016/j.ijmecsci.2019.105274>
5. Kozhevnikova G. V., Dubenets S. S. Development of the energy theory of fracture during plastic deformation of a metal. Rubanik V. V. (ed.) *Actual Problems of Strength*. Minsk, UE “ECM of the Ministry of Finance”, 2022, ch. 13, pp. 160–172.
6. Çakırcalı M., Kılıçaslan C., Güden M., Kiranlı E., Shchukin V. Y., Petronko V. V. Cross wedge rolling of a Ti6Al4V (ELI) alloy: the experimental studies and the finite element simulation of the deformation and failure. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2013, vol. 65, iss. 9–12, pp. 1273–1287. <https://doi.org/10.1007/s00170-012-4256-3>
7. Kozhevnikova G. V. Deformation criterion of fracture in plastic flow. *Vestsi Natsyyanal'nai akademii navuk Belarusi. Seryya fizika-technichnykh navuk = Proceedings of the National Academy of Sciences of Belarus. Physical-technical series*, 2010, no. 2, pp. 61–68 (in Russian).
8. Rice J. R., Tracey D. M. On the ductile enlargement of voids in triaxial stress fields. *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*, 1969, vol. 17, iss. 3, pp. 201–217. [https://doi.org/10.1016/0022-5096\(69\)90033-7](https://doi.org/10.1016/0022-5096(69)90033-7)
9. Ko Y. K., Lee J. S., Huh H., Kim K. K., Park S. H. Prediction of fracture in hub-hole expanding process using a new ductile fracture criterion. *Journal of Materials Processing Technology*, 2007, vol. 187–188, pp. 358–362. <http://doi.org/10.1016%2Fj.jmatprotec.2006.11.071>
10. Oyane M. Criteria of Ductile Fracture Strain. *Bulletin of JSME*, 1972, vol. 15, iss. 90, pp. 1507–1513. <https://doi.org/10.1299/jsme1958.15.1507>
11. Oh S. I., Chen C. C., Kobayashi S. Ductile fracture in axisymmetric extrusion and drawing. Part II. Workability in extrusion and drawing. *Journal of Engineering for Industry*, 1979, vol. 101, iss. 1, pp. 36–44. <https://doi.org/10.1115/1.3439471>
12. Brozzo P., Deluca B., Rendina R. A new method for the prediction of formability limits in metal sheets. *Sheet metal forming and formability: 7<sup>th</sup> Biennial Congress of the International Deep Drawing Research Group' 72: [Proceedings]: Amsterdam, October 9–13, 1972*. Amsterdam, 1972.
13. Zhan M., Gu C., Jiang Z., Hu L., Yang H. Application of ductile fracture criteria in spin-forming and tube-bending processes. *Computational Materials Science*, 2009, vol. 47, iss. 2, pp. 353–365. <http://doi.org/10.1016%2Fj.commatsci.2009.08.011>
14. Ayada M., Higashino T., Mori K. Central bursting in extrusion of inhomogeneous materials. *Proceedings of the First International Conference on Technology of Plasticity, Tokyo, Japan, 3–7 September 1984*, pp. 553–558.
15. Pater Z., Gontarz A., Tomczak J., Bulzak T. Determination of the Critical Value of Material Damage in a Cross Wedge Rolling Test. *Materials*, 2021, vol. 14, no. e1586, pp. 1–18. <http://doi.org/10.3390/ma14071586>
16. Kozhevnikova G., Shchukin V. *Plastic Properties of Metals and Alloys: Phenomenological Deformation Theory of Destruction in Plastic Flow*. Minsk, Belaruskaya navuka Publ., 2021. 277 p. (in Russian).
17. Kolmogorov V. L. (ed.) *Plasticity and Destruction*. Moscow, Metallurgia Publ., 1977. 336 p. (in Russian).

## Информация об авторах

*Кожевникова Гражина Валерьевна* – доктор технических наук, главный научный сотрудник лаборатории точной штамповки и поперечно-клиновой прокатки, Физико-технический институт Национальной академии наук Беларуси (ул. Академика Купревича, 10, 220141, Минск, Республика Беларусь). E-mail: fti@tut.by

*Щукин Валерий Яковлевич* – кандидат технических наук, доцент, ведущий научный сотрудник, Республиканское инновационное унитарное предприятие «Научно-технологический парк БНТУ «Политехник» (ул. Я. Коласа, 24, 220131, Минск, Республика Беларусь). E-mail: fti@tut.by

*Дубенец Станислав Сергеевич* – младший научный сотрудник лаборатории точной штамповки и поперечно-клиновой прокатки, Физико-технический институт Национальной академии наук Беларуси (ул. Академика Купревича, 10, 220141, Минск, Республика Беларусь). E-mail: dubenetsss@gmail.com

## Information about the authors

*Grazhina V. Kozhevnikova* – Dr. Sc. (Engineering), Chief Researcher of the Laboratory of Close Tolerance Forging and Cross-Wedge Rolling, Physical-Technical Institute of the National Academy of Sciences of Belarus (10, Academician Kuprevich Str., 220141, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: fti@tut.by

*Valery Ya. Shchukin* – Ph. D (Engineering), Associate Professor, Leading Researcher “Science and Technology Park BNTU “Polytechnic”, the Belarusian National Technical University (24, Ya. Kolas Str., 220131, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: fti@tut.by

*Stanislav S. Dubianets* – Junior Researcher of the Laboratory of Close Tolerance Forging and Cross-Wedge Rolling, Physical-Technical Institute of the National Academy of Sciences of Belarus (10, Academician Kuprevich Str., 220141, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: dubenetsss@gmail.com

**ЭНЕРГЕТИКА, ТЕПЛО- И МАССООБМЕН**  
**POWER ENGINEERING, HEAT AND MASS TRANSFER**

УДК 549.7+662.756

<https://doi.org/10.29235/1561-8358-2022-67-4-379-392>

Поступила в редакцию 24.02.2022

Received 24.02.2022

**М. В. Малько<sup>1</sup>, К. В. Доброго<sup>2</sup>, С. В. Василевич<sup>3</sup>, Д. В. Дегтеров<sup>1</sup>**<sup>1</sup>*Институт энергетики Национальной академии наук Беларуси, Минск, Республика Беларусь*<sup>2</sup>*Белорусский национальный технический университет, Минск, Республика Беларусь*<sup>3</sup>*Белорусская государственная академия авиации, Минск, Республика Беларусь***КАТАЛИТИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА НЕКОТОРЫХ МИНЕРАЛЬНЫХ СОЛЕЙ  
ПО ОТНОШЕНИЮ К ПРОЦЕССУ РАЗЛОЖЕНИЯ ПИРОЛИТИЧЕСКОЙ СМОЛЫ**

**Аннотация.** Обсуждаются результаты экспериментального исследования термического разложения древесной пиролизической смолы в гомогенном процессе, а также в присутствии ряда минеральных веществ: сульфата калия, сульфата магния, монокалийфосфата и минерального остатка производства калийных солей (МОКС). Опыты выполнены на лабораторной установке в изотермических условиях при температурах 300, 350 и 400 °С по двум методам, обеспечивающим двухфазный и трехфазный контакт с катализатором соответственно. Установлено, что скорость разложения пиролизической смолы в изученных условиях подчиняется закономерностям, описываемым уравнением Аврамы–Ерофеева с переменным показателем  $n$ . Область изменения этого показателя в различных опытах включает величины от 0,415 до 1,238. Среднее значение показателя  $n$ , рассчитанное по всем вариантам исследования, составило 0,694 (95 % ДИ от 0,605 до 0,783), а медианное значение – 0,639. Обнаружено, что скорость разложения пиролизической смолы возрастает в случае внесения в реакционную зону частиц МОКС, сульфата калия и сульфата магния. Не было обнаружено влияния монокалийфосфата на скорость разложения литической смолы. Показано, что в случае присутствия в процессе МОКС увеличение скорости разложения (убыли) пиролизической смолы обусловлено каталитическим эффектом этого вещества. Наиболее вероятной причиной положительного влияния сульфата калия, а также сульфата магния на скорость разложения пиролизической смолы, по-видимому, также является каталитическое воздействие этих веществ. Определены Аррениусовские параметры гомогенного процесса термического разложения смолы и процесса разложения в присутствии МОКС, а также сульфатов калия и магния. Согласно полученным данным, энергия активации гомогенного процесса составила 29,6 кДж/моль, а предэкспоненциальный фактор –  $3,15 \cdot 10^1 \text{ мин}^{-1}$  соответственно. Аррениусовские параметры разложения пиролизической смолы в присутствии МОКС по данным выполненных исследований составили 23,0 кДж/моль и  $1,82 \cdot 10^1 \text{ мин}^{-1}$ . Определены Аррениусовские параметры разложения пиролизической смолы в присутствии  $\text{K}_2\text{SO}_4$  и  $\text{MgSO}_4$ . В соответствии с оценками энергия активации в присутствии этих веществ составила порядка 50–60 кДж/моль. Представленные в статье результаты исследований могут быть использованы при проектировании теплогенерирующего оборудования, включающего в себя систему очистки продуктов термохимической конверсии растительного сырья.

**Ключевые слова:** пиролизные смолы, сульфат калия, сульфат магния, монокалийфосфат, минеральный остаток калийного производства, кинетика разложения, энергия активации, предэкспоненциальный фактор

**Для цитирования:** Каталитические свойства некоторых минеральных солей по отношению к процессу разложения пиролизической смолы / М. В. Малько [и др.] // Вест. Нац. акад. наук Беларусі. Сер. фіз.-тэхн. навук. – 2022. – Т. 67, № 4. – С. 379–392. <https://doi.org/10.29235/1561-8358-2022-67-4-379-392>

**Mikhail V. Malko<sup>1</sup>, Kirill V. Dobrego<sup>2</sup>, Siarhei V. Vasilevich<sup>3</sup>, Dmitry V. Degterov<sup>1</sup>**<sup>1</sup>*Institute of Power Engineering of the National Academy of Sciences of Belarus, Minsk, Republic of Belarus*<sup>2</sup>*Belarusian National Technical University, Minsk, Republic of Belarus*<sup>3</sup>*Belarusian State Aviation Academy, Minsk, Republic of Belarus***CATALYTIC PROPERTIES OF SOME MINERAL SALTS IN RELATION  
TO THE PROCESS OF DECOMPOSITION OF PYROLYSIS TAR**

**Abstract.** The paper discusses the results of an experimental study of the thermal decomposition of pyrolytic wood tar in a homogeneous process, as well as in the presence of a number of mineral substances: potassium sulfate, magnesium sulfate, monopotassium phosphate and the mineral residue of the production of potassium salts. The experiments were carried out on