

ISSN 2307-5732

НАУКОВИЙ ЖУРНАЛ

6.2014

---

# ВІСНИК

**Хмельницького  
національного  
університету**

Технічні науки  

---

Technical sciences

SCIENTIFIC JOURNAL

HERALD OF KHMELNYTSKYI NATIONAL UNIVERSITY

2014, Issue 6, Volume 219

Хмельницький

**ВІСНИК  
ХМЕЛЬНИЦЬКОГО НАЦІОНАЛЬНОГО УНІВЕРСИТЕТУ  
серія: Технічні науки**

Затверджений як фахове видання  
Наказ МОН 04.07.2014 №793

*Засновано в липні 1997 р.*

*Виходить 6 разів на рік*

---

**Хмельницький, 2014, № 6 (219)**

---

**Засновник і видавець: Хмельницький національний університет  
(до 2005 р. – Технологічний університет Поділля, м. Хмельницький)**

Включено до наукометричних баз:

<b>РИНЦ</b>	<a href="http://elibrary.ru/title_about.asp?id=37650">http://elibrary.ru/title_about.asp?id=37650</a>
<b>Google Scholar</b>	<a href="http://scholar.google.com.ua/citations?hl=uk&amp;user=aIUP9OYAAAAJ">http://scholar.google.com.ua/citations?hl=uk&amp;user=aIUP9OYAAAAJ</a>
<b>Index Copernicus</b>	<a href="http://jml2012.indexcopernicus.com/passport.php?id=4538&amp;id_lang=3">http://jml2012.indexcopernicus.com/passport.php?id=4538&amp;id_lang=3</a>
<b>Polish Scholarly Bibliography</b>	<a href="https://pbn.nauka.gov.pl/journals/46221">https://pbn.nauka.gov.pl/journals/46221</a>

**Головний редактор**

**Скиба М. Є.**, заслужений працівник народної освіти України, член-кореспондент Національної академії педагогічних наук України, д.т.н., професор, ректор Хмельницького національного університету

**Заступник головного редактора**

**Параска Г. Б.**, д.т.н., професор, проректор з наукової роботи Хмельницького національного університету

**Відповідальний секретар**

**Гуляєва В. О.**, завідувач відділом інтелектуальної власності і трансферу технологій Хмельницького національного університету

**Ч л е н и р е д к о л е г і ї**

*Технічні науки*

Березненко М.П., д.т.н., Бубулис Алгимантас, д.т.н. (Литва), Гордєєв А.І., д.т.н., Грабко В.В., д.т.н., Диха О.В., д.т.н., Жултовський Б., д.т.н. (Польща), Зубков А.М., д.т.н., Камбург В.Г., д.т.н. (Росія), Каплун В.Г., д.т.н., Карван С.А., д.т.н., Карташов В.М., д.т.н., Кичак В.М., д.т.н., Кіницький Я.Т., д.т.н., Коновал В.П., д.т.н., Коробко Є.В., д.т.н. (Білорусія), Костогриз С.Г., д.т.н., Кофанов Ю.М., д.т.н. (Росія), Мазур М.П., д.т.н., Мандзюк І.А., д.т.н., Мельничук П.П., д.т.н., Мясцев О.А., д.т.н., Натріашвілі Т.М., д.т.н. (Грузія), Нелін Є.А., д.т.н., Павлов С.В., д.т.н., Пастух І.М., д.т.н., Поморова О.В., д.т.н., Пановко Г.Я., д.т.н. (Росія), Попов В., доктор природничих наук (Німеччина), Прохорова І.А., д.т.н., Рогатинський Р.М., д.т.н., Ройзман В.П., д.т.н., Рудницький В.Б., д.фіз.-мат.н., Сарібеков Г.С., д.т.н., Сілін Р.І., д.т.н., Славінська А.Л., д.т.н., Сорокатиї Р.В., д.т.н., Сурженко Є.Я., д.т.н. (Росія), Троцишин І.В., д.т.н., Шалапко Ю.І., д.т.н., Шинкарук О.М., д.т.н., Шклярський В.І., д.т.н., Щербань Ю.Ю., д.т.н., Юрков М.К., д.т.н. (Росія), Ясній П.В., д.т.н.

*Технічний редактор*

Горященко К. Л., к.т.н.

*Редактор-коректор*

Броженко В. О.

**Рекомендовано до друку рішенням вченої ради Хмельницького національного університету,  
протокол № 5 від 26.11.2014 р.**

**Адреса редакції:** редакція журналу "Вісник Хмельницького національного університету"  
Хмельницький національний університет  
вул. Інститутська, 11, м. Хмельницький, Україна, 29016

**т** (038-22) 2-51-08

**web:** <http://journals.khnu.km.ua/vestnik>

**e-mail:** [visnyk\\_khnu@rambler.ru](mailto:visnyk_khnu@rambler.ru)

<http://vestnik.ho.com.ua>

<http://visniktup.narod.ru>

[http://library.tup.km.ua/visnyk\\_tup.htm](http://library.tup.km.ua/visnyk_tup.htm)

Зареєстровано Міністерством України у справах преси та інформації.  
Свідоцтво про державну реєстрацію друкованого засобу масової інформації  
**Серія КВ № 9722 від 29 березня 2005 року**

© Хмельницький національний університет, 2014  
© Редакція журналу "Вісник Хмельницького національного університету", 2014

**ВЫБОР КРИТЕРИЕВ РАЗРУШЕНИЯ В ЗАДАЧАХ  
ОБРАБОТКИ МЕТАЛЛОВ ДАВЛЕНИЕМ**

В работе изучалось влияние применения критериев разрушения в задачах обработки металлов давлением на конечный результат исследований. Проведен анализ полученных данных по критериям Г.А. Смирнова-Аляева, В.Л. Колмогорова и В.А. Огородникова. В результате обоснована целесообразность применения критериев разрушения в задачах обработки металлов давлением определяемая скоростью накопления повреждений и кривизной пути деформирования. Приведены рекомендации по применению критериев Г.А. Смирнова-Аляева, В.Л. Колмогорова и В.А. Огородникова в задачах обработки давлением. Разработан маршрут волочения проводов учитывающий скорость накопления повреждений. Получены инженерные формулы для оценки использованного ресурса пластичности при формообразовании отводов из материалов с различной упрочняемостью.

Ключевые слова: критерий, кривизна пути деформирования, ресурс пластичности, траектория деформирования.

V. A. FEDOTOV, A. V. GUTSALYUK, R. S. TKACHENKO  
Vinnytsia National Technical University

**ON THE SELECTION CRITERIA IN PROBLEMS OF DESTRUCTION METAL FORMING**

*Abstract - In this work we studied the effect of applying the criteria of destruction in the problems of metal forming the final result of research. The analysis of the data obtained by criteria G.A. Smirnov-Alyaeu, V.L. Kolmogorov and V.A. Ogorodnikov. Substantiates the appropriateness of applying the criteria of destruction in the problems of metal forming. It is determined by the rate of damage accumulation and the curvature of the path of deformation. The recommendations for the application of the criteria G.A. Smirnov-Alyaeu, V.L. Kolmogorov and V.A. Ogorodnikov in tasks pressure treatment. Designed route drawing wires into account the rate of accumulation of damage. The engineering formulas used to estimate the plasticity resource in forming taps of materials with different hardenability.*

*Keywords: criterion, the curvature of the path of deformation plasticity resource, the deformation path.*

Феноменологические критерии разрушения, применяемые в обработке металлов давлением для оценки использованного ресурса пластичности заготовок, предельных до разрушения деформаций, а также при испытании материалов в области конечных деформаций, позволяют решать указанные задачи, однако их использование часто вызывает затруднения методического характера.

Многие процессы холодной обработки металлов давлением сопровождаются сложным нагружением, при этом следуя терминологии А.А. Ильюшина они классифицируются как траектории малой, средней и большой кривизны. Применение критериев для указанных процессов оправдано в случаях, когда точность расчетов удовлетворяет технолога, проектирующего процесс.

Целью данной работы является выбор феноменологических критериев разрушения для оценки использованного ресурса пластичности в различных процессах пластического формоизменения, позволяющих с минимальным количеством экспериментов получить надежные результаты расчета использованного ресурса пластичности.

Рассмотрим результаты экспериментальных исследований пластичности сталей Р18, Р9, 45 полученные в работе [1] испытанием образцов на совместное кручение с растяжением на фоне переменного гидростатического давления. При этом реализовали траектории деформирования  $\eta = const$ ,  $\frac{d\eta}{de_u} > 0$ ,

$\frac{d\eta}{de_u} \leq 0$ . Здесь  $\eta$  – показатель напряженного состояния.

$$\eta = \frac{\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3}{\sigma_u}, \quad (1)$$

равный отношению гидростатического давления к интенсивности напряжений.

В дальнейшем процессы нагружения будем рассматривать не в пятимерном пространстве тензора деформаций, а в пространстве безразмерных показателей напряженного состояния  $\eta$ ,  $\chi = \frac{\sqrt[3]{\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3}}{\sigma_u}$  [1],

$\mu_\sigma = 2 \frac{\sigma_2 - \sigma_3}{\sigma_1 - \sigma_3}$  – параметр Надаи-Лоде. Заметим, что первая производная от показателей напряженного

состояния характеризует скорость накопления повреждений  $(\frac{d\eta}{de_u}, \frac{d\chi}{de_u}, \frac{d\mu_\sigma}{de_u})$ , а вторая производная

от показателей  $(\frac{d^2\eta}{de_u^2}, \frac{d^2\chi}{de_u^2}, \frac{d^2\mu_\sigma}{de_u^2})$  характеризует кривизну пути деформирования.

Анализ экспериментальных данных, полученных в работе [1] позволил оценить влияние первой производной от показателя  $\eta$   $\frac{d\eta}{de_u} > 0 = 0,07 \div 25$ ,  $\frac{d\eta}{de_u} \leq 0 = (-0,2) \div (-0,9)$ .

Расчет предельных до разрушения степеней деформации (накопленной интенсивности деформаций)

$$e_p = \int_0^{t_p} \bar{\varepsilon}_u d\tau, \tag{2}$$

где  $\bar{\varepsilon}_u$  – интенсивность скоростей деформаций,  $t_p$  – время разрушения проводили по критериям:

Г. А. Смирнова-Аляева [2]

$$\psi = \frac{e_u}{e_p(\eta)} \leq 1, \tag{3}$$

В. Л. Колмогорова [3]

$$\psi = \int_0^{t_p} \frac{\bar{\varepsilon}_u}{e_p(\eta)} \leq 1 \tag{4}$$

и В. А. Огородникова (1)

$$\psi = \int_0^{e_p^*} \left( 1 + 0,2 \operatorname{arctg} \frac{d\eta}{de_u} \right) \frac{e_u^{0,2 \operatorname{arctg} \frac{d\eta}{de_u}} de_u}{[e_p(\eta, \chi)]^{1+0,2 \operatorname{arctg} \frac{d\eta}{de_u}}} \leq 1 \tag{5}$$

В критериях (3), (4) и (5),  $t$  – время деформирования,  $\psi$  – использованный ресурс пластичности.

В работе [1] приведены экспериментальные данные о пластичности цилиндрических образцов из материалов не образующих шейки при растяжении (стали Р9, Р12, Р18). Цилиндрические образцы подвергали совместному кручению и растяжению на фоне изменяющегося гидростатического давления, при этом возможно реализовать различные траектории деформирования  $\eta = \eta(e_u)$ ,  $\eta = const$ ,  $\chi = const$ ,  $\chi = \chi(e_u)$ . На рис. 1 показаны пути деформирования  $\eta = \eta(e_u)$ , а также диаграмма пластичности стали Р18.

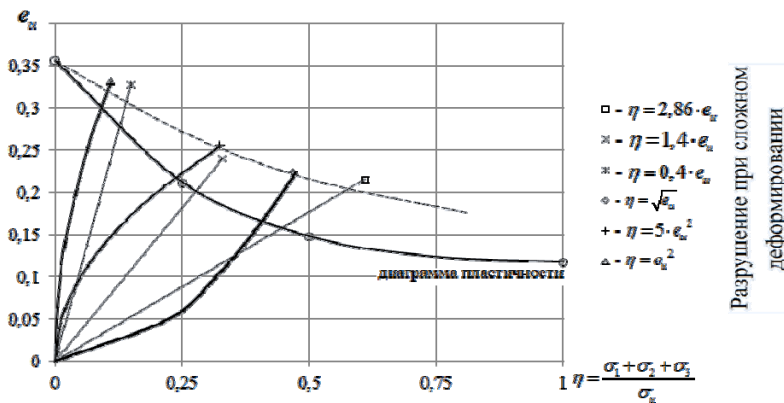


Рис. 1. Влияние истории деформирования на пластичность стали Р18 [1]

Результаты изложенного выше анализа экспериментальных данных указывают на заметное влияние скорости изменения показателя напряженного состояния в виде параметра  $\frac{d\eta}{de_u}$ . Если  $\frac{d\eta}{de_u}$  возрастает, увеличивается влияние истории деформирования на величину предельных деформаций ( $e_p$  выше по сравнению с величиной  $e_p$  определенной по диаграмме пластичности). В случае

изменения знака производной  $\frac{d\eta}{de_u} < 0$  пластичность падает (по сравнению с величиной  $e_p$  определенной по диаграмме пластичности). Заметим, однако, что функция  $\eta = \eta(e_u)$  включает в себя переменность двух параметров – показателя  $\eta$  и кривизну траектории деформации  $H = \frac{1}{\rho}$  (следуя терминологии А. А. Ильюшина). С тем, чтобы выделить влияние каждого параметра в работе [1] получены зависимости кривизны траектории деформаций  $\gamma = \gamma(e_2)$  от осевой деформации  $e_2$  для образцов, деформируемых в условиях сложной деформации  $\eta = 2,86 \cdot e_u$ ,  $\eta = \sqrt{e_u}$ ,  $\eta = e_u^2$ ,  $\eta = 1,4 \cdot e_u$ . При указанных траекториях кривизны траектория деформации меняется от  $H = 8$  до  $H = 0,5$ , величина предельных деформаций (рис. 2) слабо зависит от кривизны  $H$  траектории деформаций. При этом показатель  $\eta$  меняется практически

одинаково для путей деформирования  $\eta = 2,86 \cdot e_u$ ,  $\eta = \sqrt{e_u}$ . Совпадение фактических деформаций при разрушении образцов  $\eta = \sqrt{e_u}$  и  $\eta = 2,86 \cdot e_u$ , а также образцов  $\eta = e_u^2$  и  $\eta = 1,4 \cdot e_u$  позволяют предположить, что на пластичность основное влияние оказывает скорость изменения показателя  $\eta$ , а не кривизна траектории деформаций. Этот вывод можно отнести к траекториям малой или средней кривизны.

Главным преимуществом задания траекторий нагружения в пространстве безразмерных показателей напряженного состояния заключается в том, что в этом случае вид «пути деформирования» однозначно определяется условиями формоизменения, характерными заданного процесса и практически не зависит от механических свойств материала [1]. Это позволяет моделировать процессы обработки давлением на модельных материалах, в этом случае необходимо иметь кривые течения  $\sigma_u = f(e_u)$  и диаграммы пластичности  $e_p = f(\eta, \chi, \mu_\sigma)$  [1].

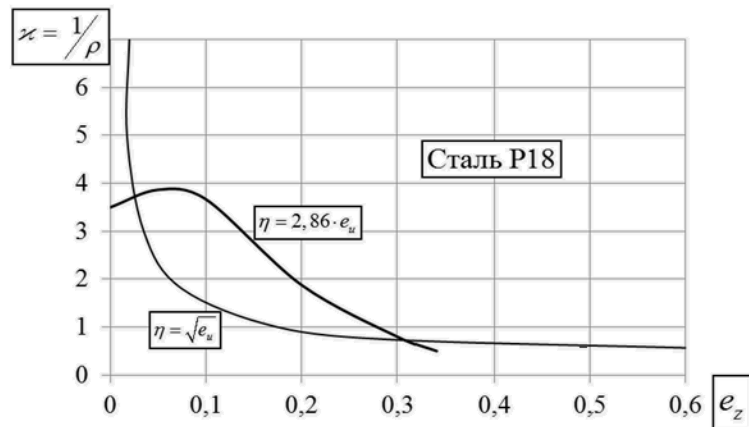


Рис. 2. Зависимость кривизны траектории деформаций  $\chi$  от осевой деформации  $e_z$  цилиндрических образцов, подвергаемых кручению совместно с растяжением [1]

В работе [1] введен коэффициент  $\omega$ , отражающие влияние скорости изменения показателя напряженного состояния на пластичность

$$\omega = \frac{e_p(\eta)}{e_p(\eta = const)} \tag{6}$$

В формуле (6)  $e_p(\eta)$  рассчитывают по критериям, или  $e_p(\eta)$  – отражает фактическую деформацию в момент разрушения;  $e_p(\eta = const)$  находят по диаграмме пластичности в месте пересечения диаграммы пластичности с путем деформирования. Таким образом, коэффициент  $\omega$  отражает влияние истории деформирования на пластичность.

Расчет предельных деформаций по критериям (3), (4), и (5) показал, что если параметр  $\frac{d\eta}{de_u}$  возрастает, то растет отклонение фактических деформаций в момент разрушения от расчетных по различным критериям. Так если  $\frac{d\eta}{de_u}$  близко к нулю все критерии дают одинаковый результат, отклонение от фактических деформаций лежат в пределах статической погрешности. При  $\frac{d\eta}{de_u} > 2$  влияние истории деформирования на пластичность достигает 23%, при этом кривизна траектории деформации  $\frac{d^2\eta}{de_u^2}$  оказывает подобное влияние – с ростом кривизны возрастает влияние истории деформирования на пластичность., в случае, если  $\frac{d\eta}{de_u} > 5$  наиболее близки результаты расчета к экспериментальным дает критерий (5). Критерий (4) показывает отклонение до 25%, критерий (3) до 30%.

**Деформируемость заготовок при формоизменении крутоизогнутых отводов новым методом холодного пластического деформирования**

Примером технологического процесса, в котором путь деформирования частиц материала практически не изменяется в процессе формообразования заготовок, является процесс изготовления крутоизогнутых отводов, в основе которого лежит одновременное дорнование с изгибом заневоленной трубы [4]. Разработанная на основе этого способа технология позволяет получать изделия из различных материалов в холодном состоянии, в том числе нержавеющей.

Для оценки возможности получения крутоизогнутых отводов из любых материалов без разрушения применен простой расчетный аппарат, т.к. путь деформирования частиц материала имеет вид  $\frac{d\eta}{de_u} = 0$ , так как показатель напряженного состояния  $\eta = const$  (рис. 3).

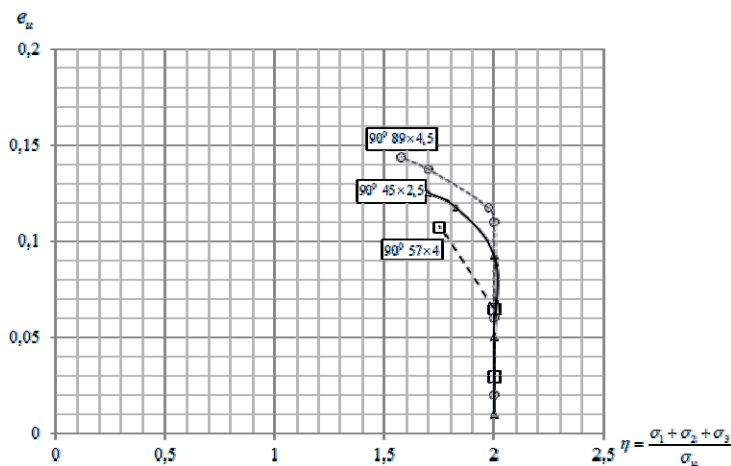


Рис. 3. Пути деформирования частиц материала опасной точки внешней зоны при формообразовании крутоизогнутых отводов [2]

в условиях двухосного растяжения. Это например, испытания в условиях растяжение образцов с выточками, проба Эриксона, изгиб и др. В случае, когда такие испытания провести не представляется возможным предлагается следующий способ определения пластичности  $e_p(\eta = 2)$ . Так в работе [5] высказано предположение, что пластичность материала при  $\eta = 2$  является линейной функцией относительного удлинения после разрыва  $\delta_p$  и имеет вид двухосного растяжения

$$e_p(\eta = 2) = C \frac{\delta_p}{100}, \tag{6}$$

где  $C = 0,65$  для сталей 45, 3, 40X, ШХ15 и ХВГ.

Таким образом с помощью критерия Г. А. Смирнова-Аляева получены инженерные формулы, которые позволяют оценивать предельную до разрушения деформацию накапливаемую в процессе формообразования крутоизогнутых отводов.

### Процесс осесимметричного волочения

Более сложным процессом обработки давлением, в котором показатель напряженного состояния изменяется существенно является процесс **осесимметричного** волочения [6]. На рис. 4 показаны пути деформирования частиц вдоль линий тока для волочения проволоки, из него следует что частицы металла вдоль линий тока подвергаются сложному нагружению, при этом показатель напряженного состояния изменяется от  $\eta = -1,75$  до 0,6.

Из [5] следует, что при холодном волочении в опасных с точки зрения разрушения зонах очага деформации находятся частицы металла на оси симметрии. На оси симметрии показатель напряженного состояния меняется от  $\eta = -1,75$  до  $\eta = 0,6$ , а коэффициент чувствительности пластичности для ряда материалов в интервале  $1 \geq \eta \geq 0$  изменяется

незначительно ( $\lambda = \ln \frac{e_p(\eta = 0)}{e_p(\eta = 1)}$ ).  $\lambda$  близок к

нулю. Поэтому для прогнозирования разрушения заготовок при волочении диаграмму пластичности допустимо строить путем испытания на растяжение, аппроксимируя ее прямой [4].

$$e_p = 2 \ln \frac{d}{d_{uu}}, \tag{7}$$

где  $d$  – начальный (исходный) диаметр проволоки,  $d_{uu}$  – диаметр «шейки» разрушенного при растяжении образца.

Если пути деформирования  $\eta = \eta(e_u)$  аппроксимировать прямыми с углом наклона к оси  $e_u$  :

Для упрощения расчетов считаем что  $\eta = const = 2$ , тогда использованный ресурс пластичности  $\psi$  равен (по Г.А.Смирнову-Аляеву)

$$\psi = \frac{e_u}{e_p(\eta = 2)} \leq 1, \tag{4}$$

$$e_u = \int_0^t \dot{\epsilon}_{ii} d\tau, \tag{5}$$

где  $e_u$  – интенсивность деформаций, определяемая тремя параметрами: внешним диаметром  $D$ , толщиной стенки  $S$  и относительным радиусом изгиба  $\rho$  заготовки (см. рис. 3).

Величину  $e_p(\eta = 2)$  можно определить путем испытания материалов

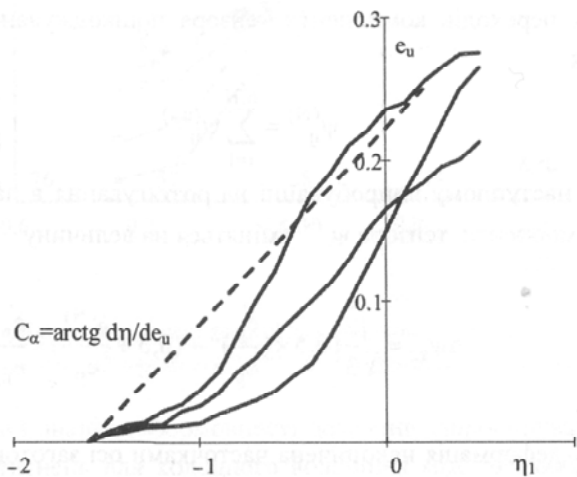


Рис. 4. Пути деформирования частиц вдоль линий тока для волочения проволоки [5]

$C_\alpha = \arctg\left(\frac{d\eta}{de_u}\right)$ , (см. рис. 4), то с помощью критерия (5) можно записать соотношение для расчета

использованного ресурса пластичности

$$\psi^{(N)} = \sum_{i=1}^{nN} (1 + 0,2C_\alpha^{(n,i)}) \int_0^{e_u^{(n,i)}} \frac{e_u^{0,2C_\alpha^{(n,i)}} de_u}{[e_p^{(N)}]^{1+0,2C_\alpha^{(n,i)}}} = \sum_{i=1}^{nN} \left(\frac{e_u^{(n,i)}}{e_p}\right)^{0,2C_\alpha^{(n,i)}+1}, \quad (8)$$

где  $n$  – количество монотонных  $i$ -х этапов деформирования на  $N$  – переходе волочения;  $e_p^{(N)}$  – пластичность при растяжении заготовок подготовленных до  $N$ -го перехода волочения;  $c_\alpha^{(n,i)}$  – угол  $C_\alpha$  на  $n$ ,  $i$ -м монотонном этапе деформирования;  $e_u^{(n,i)}$  – накопленная интенсивность деформаций на  $n$ ,  $i$ -м этапе деформирования формулу (2) проверяли путем эксперимента на примере волочения прутков проволоки из термопарных сплавов хромель, копель, никель-молибден [7]. С этой целью пластичность определяли

растяжением прутков диаметром  $D^{(n)}$  в направлении волочения  $e_p' = 2 \ln \frac{D^{(n)}}{d_{uu}^{(n)}}$ . Эту же величину можно рассчитать, т.к. условие разрушения в этом случае имеет вид

$$\psi = \frac{e_u}{e_p + \psi^{(n)}}, \quad (9)$$

отсюда

$$e_p' = e_p (1 + \psi^{(n)}). \quad (10)$$

На рис. 5 показано сопоставление ресурса пластичности для одноосного растяжения проволоки.

Анализ результатов рис. 5 нам позволяет сделать вывод: с увеличением суммарного обжатия, растет расхождение между экспериментальными и расчетными значениями. Установлено также, что при волочении с обжатием  $\delta \leq 0,25$  расхождение между экспериментальными значениями  $e_p$  и расчетными с помощью критерия

$$\left(\psi = \int_0^{e_p'} \left(1 + 0,2 \arctg \frac{d\eta}{de_u}\right) \frac{e_u^{0,2 \arctg \frac{d\eta}{de_u}}}{[e_p(\eta, \chi)]^{1+0,2 \arctg \frac{d\eta}{de_u}}} d\psi \leq 1\right)$$

) не превышает 10%, при этом расчетные значения меньше экспериментальных. Это обстоятельство позволило определить коэффициент  $C_\alpha = \arctg\left(\frac{d\eta}{de_u}\right)$  по формуле [7].

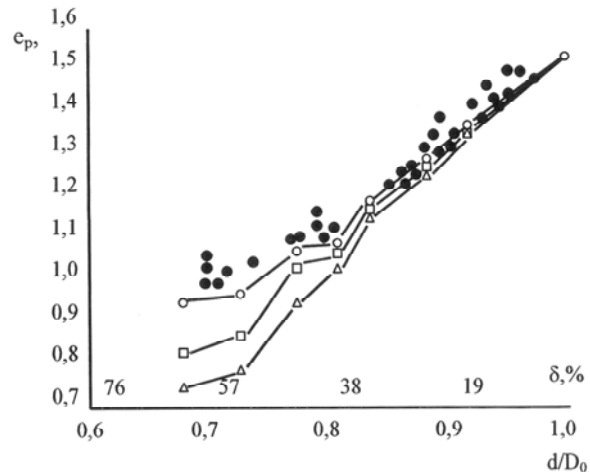


Рис. 5. Изменение ресурса пластичности для одноосного растяжения проводов: ● – результаты эксперимента; □ – расчетные значения по Дель-Огородникову, ○ – расчетные значения согласно тензорному подходу, Δ – расчетные значения по Колмогорову

$$C_\alpha^{(n)} = 5 \left[ \frac{\ln(1 - e_p'^{(n)}) / e_p^{(n)}}{\ln\left(-\ln\left(1 - \frac{\delta}{100}\right) / e_p'^{(n)}\right)} - 1 \right]. \quad (11)$$

Таким образом, маршрут операции волочения может быть построен с помощью алгоритма, основанного на критерии (5).

Для расчета использованного ресурса пластичности экспериментов проверяли на примере исследования технологии волочения проволоки и прутков из термопарных сплавов хромель, копель, алюмель и сплавов системы никель-молибден с различным содержанием молибдена (2... 17 ат %). С этой целью определяли пластичность изделия диаметром  $D^{(n)}$  для растягивания в направлении волочения:

$$e_p' = 2 \ln \frac{D^{(n)}}{d_{uu}^{(n)}}.$$

Эту же величину можно рассчитать, поскольку условие разрушения в этом случае будет иметь вид:

$$\frac{e_p'}{e_p} + \psi_p^{(n)},$$

откуда

$$e_p' = e_p (1 + \psi_p^{(n)}).$$

Результаты сравнения экспериментальных и расчетных значений представлены на рис. 5. Анализ результатов, показанных на рис. 5, позволяет сделать следующий вывод: с увеличением суммарного обжатия растет различие между экспериментальными и расчетными.

Уменьшение различия между расчетными и экспериментальными значениями  $e_p'$  можно достичь, если для прогнозирования разрушения использовать критерии, учитывающие направленный характер накопления повреждений. Пользуясь работой [39], и учитывая, что на каждом  $n$ ,  $i$ -м монотонном этапе деформирования частиц вдоль оси  $\beta_{ij} = \text{const}$ , находим компоненты тензора повреждаемости

$$\psi_{ij}^{(n,i)} = \frac{\beta_{ij}^{(n,i)}}{e_p} \int_{e_u^{(n,i-1)}}^{e_u^{(n,i)}} \left( 0,5 + \frac{e_u}{e_p} \right) de_u = \frac{\beta_{ij}^{(n,i)}}{2e_p^2} \cdot \left[ (e_u^{(n,i)} - e_u^{(n,i-1)}) (e_p + e_u^{(n,i)} + e_u^{(n,i-1)}) \right]$$

где  $e_p$  – начальная пластичность заготовок при растяжении.

За  $N$  переходов компоненты тензора повреждаемости вступят значение.

$$\psi_{ij}^{(N)} = \sum_{i=1}^{n,N} \psi_{ij}^{(n,i)} \quad (12)$$

При следующем испытании на растяжение в направлении волочения, компоненты тензора  $\psi_{ij}^{(N)}$  изменятся на величину

$$\Delta \psi_{zz} = \sqrt{\frac{2}{3} \left[ 0,5 \cdot \left( \frac{e_p'}{e_p} \right)^2 + \left( 0,5 + \frac{e_u^{(N)}}{e_p} \right) \cdot \frac{e_p'}{e_p} \right]} \quad (13)$$

где  $e_u^{(N)}$  – деформация накопленная дольками оси заготовки за  $N$  переходов волочения;  $e_p'$  – пластичность проволоки, протянутого по  $N$  переходов при растяжении.

Из условия разрушения

$$\left( \psi_{ij}^{(N)} + \Delta \psi_{ij} \right) \left( \psi_{ij}^{(N)} + \Delta \psi_{ij} \right) = 1 \quad (14)$$

находим, учитывая, что  $\psi_{ij} = 0$

$$e_p' = e_p \left( -0,5 - \frac{e_p^{(N)}}{e_p} + \sqrt{\left( 0,5 + \frac{e_u^{(N)}}{e_p} \right)^2 + 6\psi_{zz}^{(N)} + 6\psi_{zz}^{(N)2} + 4} \right). \quad (15)$$

Из сравнения расчетных и экспериментальных значений предельных деформаций  $e_p'$  при растяжении проволоки после волочения в  $N$  переходов (см. рис. 5) видно, что отклонение не превышает 10% и практически не зависит от величины суммарных обжатий.

Однако применение указанного подхода затруднительно в случаях, когда назначают маршрут волочения в производственных условиях так как возникает необходимость проводить дополнительные экспериментальные исследования при построении диаграмм пластичности.

### Выводы

1) Целесообразность применения критериев разрушения в задачах обработки металлов давлением определяется скоростью накопления повреждений и кривизной пути деформирования:

а) При значениях параметра  $\frac{d\eta}{de_u}$  близким к нулю ( $\eta = \text{const}$ ) целесообразно использовать критерий Г. А. Смирнова-Аляева (1) (например, формирование крутоизогнутых отводов, операций – гибка и др.).

б) При значениях параметра  $0,5 \leq \frac{d\eta}{de_u} \leq 1,75$  можно использовать критерий В. Л. Колмогорова (2). Применение этого критерия целесообразно, если кривизна пути деформирования находится в пределах  $0,25 \leq \frac{d^2\eta}{de_u^2} \leq 2$ .

в) В случае изменения параметра  $\frac{d\eta}{de_u} \geq 2$  наибольшую точность дает критерий В. А. Огородникова (3). Применение этого критерия целесообразно, если кривизна пути деформирования находится в пределах  $\frac{d^2\eta}{de_u^2} \geq 3$ .

2) Разработан маршрут волочения проводов основанный на критерии (3), учитывающий скорость накопления повреждений.

3) Получены инженерные формулы, позволяющие оценивать использованный ресурс пластичности



при формообразовании отводов из материалов с различной упрочняемостью.

### Литература

1. Огородников В.А. Холодне комбіноване видавлювання : монографія / Огородников В.А. Сивак Р.І. – Вінниця : ВНТУ, 2011. –180 с.
2. Смирнов-Аляев Г. А. Механические основы пластической обработки металлов / Г. А. Смирнов-Аляев. – Л. : Машиностроение, 1978. – 368 с.
3. Колмогоров В.Л. Напряжения. Деформации. Разрушение / Колмогоров В.Л. – М. : Metallurgy, 1970. – 272 с.
4. Огородников В.А. Моделирование процесса формообразования крутоизогнутых отводов на основе теории деформируемости / В. А. Огородников, А. В. Грушко // Удосконалення процесів і обладнання обробки тиском в металургії і машинобудуванні : тем. зб. наук. праць. – Краматорськ, 2000. – С. 5–10.
5. Воропаев А. А. Формообразование трехслойных цилиндрических оболочек на гибочно-растяжном прессе : автореферат дис. на соискание кандидата технических наук / Воропаев А. А. – М., 1983. – 16 с.
6. Огородников В.А. Формообразование крутоизогнутых отводов изгибом протягиваемой трубы / В.А. Огородников, О.А. Розенберг, А.В. Грушко, С. Т. Студенец, В.В. Мельниченко. – Винница : УНІВЕРСУМ-Вінниця, 2004. – 140 с.
7. Огородников В.А. Деформація волочинням і фізико-механічні властивості тонких термодарних дротів : монографія / В.А. Огородников, О. Ю. Співак, О.В. Грушко. – Вінниця : ВНТУ, 2014. – 112 с.

### References

1. Ogorodnikov V.A. Xolodne kombinovane vy'davlyuvannya: Monografiya / Ogorodnikov V.A. Sy'vak R.I. – Vinny'cya: VNTU, 2011.-180 c.[in Ukrainian]
2. Smy'nov-Alyaev G. A. Mехany'chesky'e osnovy plasty'cheskoj obrabotky' metallov / G. A. Smy'nov-Alyaev. – L.: Mashy'nostroeny'e, 1978. – 368 c.[in Russian]
3. Kolmogorov V.L. Napryazheny'ya. Deformacy'y'. Razrusheny'e – M.: Metallurgy'ya, 1970. -272 c.[in Russian]
4. Ogorodny'kov V.A. Modely'rovany'e processa formoobrazovany'ya krutoy'zognutyh otvodov na osnove teory'y' deformy'ruemosty' / V. A. Ogorodny'kov, A. V. Grushko. – Udokonalennya procesiv i obladnannya obrobky' ty'skom v metalurgiyi i mashy'nobuduvanni: Tem. zb. nauk. pracz' – Kramators'k. – 2000. – с. 5-10. [in Russian]
5. Voropaev A. A. Formoobrazovany'e trexslujnyh cy'ly'ndry'chesky'x obolochok na gy'bochno-rastyazhnom prese: Avtoreferat dy'sertacy'y' na kandy'data texny'chesky'x nauk. – Moskva: 1983. – 16 c.[in Russian]
6. Ogorodny'kov V.A. Formoobrazovany'e krutoy'zognutyh otvodov y'zgy'bom protyagy'vaemoj truby / V.A. Ogorodny'kov, O.A. Rozenberg, A.V. Grushko, S. T. Studenez, V.V. Mel'ny'chenko. – Vy'mny'cya: UNIVERSUM - Vinny'cya, 2004. – 140 c.[in Russian]
7. Ogorodnikov V.A. Deformaciya volochinnyam i fizy'ko-mexanichni vlasty'vosti tonky'x termoparny'x drotiv: monografiya / V.A. Ogorodnikov, O. Yu. Spivak, O.V. Grushko. – Vinny'cya : VNTU, 2014. - 112 c.[in Russian]

Рецензія/Peer review : 27.10.2014 р.

Надрукована/Printed :29.11.2014 р.

Рецензент: професор О.В. Грушко

- 
34. Kondratov V.T., Kondratov Yu.T., Klassifikatsija interfejsov szmeritelnykh sistem i priborov/ V.T.Kondratov, Yu.T.Kondratov // Visnyk Khmel'nitskogo natsionalnogo universytetu. Tekhnichni nauky. — 2014. — № 4. — S. 85 – 97.  
35. Izmeritelnyje tekhnologii V XI. Rezhim dostupa: <http://vxi.su/>.

Рецензія/Peer review : 17.7.2014 р.

Надрукована/Printed : 1.12.2014 р.

---

За зміст повідомлень редакція відповідальності не несе

**Повні вимоги до оформлення рукопису**  
**<http://visnikup.narod.ru/rules/>**

**Рекомендовано до друку рішенням вченої ради Хмельницького національного університету,  
протокол № 5 від 26.11.2014 р.**

Підп. до друку 27.11.2014 р. Ум.друк.арк. 18,26 Обл.-вид.арк. 22,65  
Формат 30x42/4, папір офсетний. Друк різнографією.  
Наклад 100, зам. № \_\_\_\_\_

---

Тиражування здійснено з оригінал-макету, виготовленого  
редакцією журналу “Вісник Хмельницького національного університету”  
редакційно-видавничим центром Хмельницького національного університету  
29016, м. Хмельницький, вул. Інститутська, 7/1. тел (0382) 72-83-63