

9. Грудев А. П. Трение и смазки при обработке металлов давлением: справочник / А. П. Грудев, Ю. В. Зильберг, В. Т. Тилик. – М.: Металлургия, 1982. – 312 с.

**Bibliography (transliterated):** 1. Tehnologija kuvanja L. M. Sokolov, I. S. Aliev, O. Є. Markov, L. I. Alieva. – Kramators'k : DDMA, 2011. – 268 p. 2. Dovnar S. A. Termomehanika uprochnenija i razrushenija shtampov ob"yomnoi shtampovki S. A. Dovnar. – Moscow: Mashinostroenie, 1975. – 254 p. 3. Kuhar' V. V. Modelirovanie formoizmenenija metalla pri osadke cilindricheskikh zagotovok vypuklymi prodolgovatymi plitami V. V. Kuhar', S. A. Korotkii, V. A. Burko Visnik Hmel'nic'kogo nac. un-tu. – Hmel'nic'kii, 2008. – No 5. – P. 204–208. 4. Kuhar' V. V. Vlijanie radiusnosti vypuklykh prodolgovatykh osadochnykh plit na deformirovannoe sostojanie i stepen' ispol'zovanija zapasa plastichnosti pri kuznechnoi osadke V. V. Kuhar' Obrabotka materialov davleniem: sb. nauch. tr. DGMA. – Kramatorsk, 2012. – No 1 (30). – P. 105–111. 5. Kuhar' V. V. Issledovanie naprjazhenno–deformirovannogo sostojanija zagotovok pri profilirovanii vypuklymi plitami s yekscentrisitetom nagruzki V. V. Kuhar', R. S. Nikolenko Problemi tribologii (Problems of Tribology). – 2012. – No 3. – P. 132–136. 6. Kuhar' V. V. Issledovanie formoizmenenija zagotovok pri profilirovanii vypuklymi plitami s yekscentrisitetom nagruzki V. V. Kuhar', B. S. Kargin, R. S. Nikolenko Visnik Nacional'nogo tehničnogo universitetu «HPI»: Zbirnik naukovih prac'. Tematichnii vipusk: Novi rishennja v suchasnihih tehnologijah. – Kharkov: NTU «HPI», 2012. – No 46. – P. 71–76. 7. Kuhar' V. V. Analiz processa osadki zagotovok konicheskimi plitami metodom smeshyonnykh ob"yomov V. V. Kuhar', R. V. Suglobov, B. S. Kargin, R. S. Nikolenko Zahist metalurgiinih mashin vid polomok: Zb. Nauk. Pr. – Mariupol', 2012. No 14. – P. 63–66. 8. Kuhar' V.V. Rasshirenie tehnologicheskikh vozmozhnostei i preimushstva predvaritel'nogo profilirovanija vypuklymi vstavkami v processe gorjachei ob"yomnoi shtampovki pokovok plastin V.V. Kuhar', R.S. Nikolenko, R.V. Suglobov Izvestija MGTU «MAMI»: Nauchnyi recenziruemyi zhurnal. Serija 2. Tehnologija mashinostroenija i materialy. – Moscow, MGTU «MAMI», 2013. – No2(16), t.2. – p. 71–76. 9. Grudev A. P. Trenie i smazki pri obrabotke metallov davleniem: spravochnik A. P. Grudev, YU. V. Zil'berg, V. T. Tilik. – Moscow: Metallurgija, 1982. – 312 p.

Поступила (received) 28.10.2014

УДК 621.7.011

**В. А. ОГОРОДНИКОВ**, докт. техн. наук, зав. каф., ВНТУ;

**А. В. ГРУШКО**, докт. техн. наук, дир. ИнМАД ВНТУ;

**А. В. ГУЦАЛЮК**, аспирант, ВНТУ, Винница

## **ВЫБОР КРИТЕРИЕВ ДЕФОРМИРУЕМОСТИ ПРИ ОЦЕНКЕ ИСПОЛЬЗОВАННОГО РЕСУРСА ПЛАСТИЧНОСТИ В ПРОЦЕССАХ ОБРАБОТКИ МЕТАЛЛОВ ДАВЛЕНИЕМ**

Приведены результаты исследований пластичности металлов при объемном напряженном состоянии. Показано влияние инвариантов тензора напряжений на пластичность. При этом процесс нагружения образцов рассматривается в пространстве трех безразмерных инвариантных характеристик напряженно-деформированного состояния. Показано, что на пластичность оказывает влияние первая и вторая производная от показателей напряженного состояния. Показано также, что критерии деформируемости, основанные на линейной теории накопления повреждений, дают существенное отклонение между результатами расчета и экспериментом.

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

**Введение.** При изготовлении заготовок методами обработки давлением на поверхности, или в середине деформируемого металла могут возникать макротрещины, или напротив запас пластичности используется недостаточно.

---

© В. А. Огородников, А. В. Грушко, А. В. Гуцалюк, 2014

Использованный ресурс пластичности в таком случае является мерой качества и его прогнозирование на стадии проектирования технологических процессов является актуальной задачей теории обработки металлов давлением.

Надежное проектирование технологии, выбор параметров технологических процессов, обеспечивающих качество продукции металлообработки, можно осуществить путем применения феноменологических критериев разрушения, позволяющих оценивать использованный ресурс пластичности. Однако применение этих критериев для расчета предельного формоизменения в процессах обработки давлением, сопровождающихся объемной схемой напряженного состояния вызывает трудности методического характера.

Феноменологические критерии разрушения включают в себя подынтегральные функции зависимости предельных до разрушения деформаций  $e_p$  от показателей напряженного состояния. Такие функции  $e_p = f(\eta)$  – называют диаграммой пластичности. В работе [1] показано, что диаграммы пластичности  $e_p = f(\eta)$  не являются едиными для различных напряженных состояний. Вопрос о влиянии истории деформирования на пластичность в условиях объемного напряженного состояния не достаточно изучен.

Настоящая работа посвящена анализу современных феноменологических критериев деформируемости, применяемых для оценки использованного ресурса пластичности в процессах обработки металлов давлением, сопровождающихся объемной схемой напряженного состояния.

**Анализ экспериментальных исследований.** Рассмотрим результаты экспериментальных исследований пластичности сталей Р18, Р9, 45 полученные в работе [1] путем испытания образцов на совместное кручение с растяжением на фоне переменного гидростатического давления. При этом реализованы траектории  $\eta = const$  и  $\frac{d\eta}{de_u} > 0$  и  $\frac{d\eta}{de_u} < 0$  ( $\eta$  – безразмерный показатель напряженного состояния, равный отношению гидростатического давления к интенсивности напряжений).

Расчет предельных до разрушения степеней деформации проводили по феноменологическим критериям:

Г. А. Смирнова-Аляева [2]

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

В. Л. Колмогорова [3]

$$\psi = \int_0^t \frac{\bar{\varepsilon}_u d\tau}{e_p(\eta)} \leq 1 \quad (2)$$

и В. А. Огородникова [1]

$$\psi = \int_0^{e_p^*} \left( 1 + 0,2 \operatorname{arctg} \frac{d\eta}{de_n} \right) \frac{e_n^{0,2 \operatorname{arctg} \frac{d\eta}{de_n}}}{\left[ e_p(\eta, \chi) \right]^{1 + 0,2 \operatorname{arctg} \frac{d\eta}{de_n}}} de_n \leq 1. \quad (3)$$

В критериях (1), (2) и (3) –  $e_n = \int_0^t \bar{\varepsilon}_n d\tau$  – накопленная интенсивность деформаций;

$\bar{\varepsilon}_n$  – интенсивность скоростей деформаций;  $t$  – время деформирования;

$$\eta = \frac{I_1(T_\sigma)}{\sqrt{3 \cdot I_2(D_\sigma)}} = \frac{3\sigma}{\sigma_n}, \quad (4)$$

где  $\eta$  – показатель напряженного состояния;  $I_1(T_\sigma)$  – первый инвариант тензора напряжений;

$I_2(D_\sigma)$  – второй инвариант диватора напряжений.

$$\chi = \frac{\sqrt[3]{I_3(T_\sigma)}}{\sqrt{3 \cdot I_2(D_\sigma)}} = \frac{\sqrt[3]{\sigma_1 \cdot \sigma_2 \cdot \sigma_3}}{\sigma_n}, \quad (5)$$

где  $\chi$  – показатель напряженного состояния, учитывающий третий инвариант тензора напряжений;

$$\sigma = \frac{\sigma_{ij} \delta_{ij}}{3}, \quad (6)$$

где  $\sigma$  – среднее напряжение (гидростатическое давление).

Показатель  $\eta$  введен в работе [2], показатель  $\chi$  в работе [1].

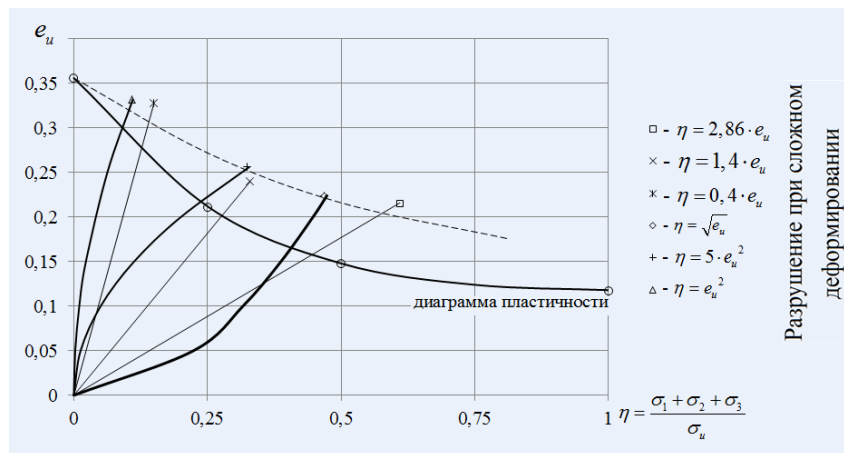


Рис. 1 – Влияние истории деформирования на пластичность стали Р18 [1]

В работе [1] приведены экспериментальные данные о пластичности цилиндрических образцов из материалов не образующих шейку 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  $\eta = \eta(e_n)$ ,  $\eta = const$ ,  $\chi = const$ ,  $\chi = \chi(e_u)$ . На рис. 1 показаны пути деформирования  $\eta = \eta(e_n)$ , а также диаграмма пластичности стали P18.

Результаты изложенного выше анализа экспериментальных данных указывают на заметное влияние скорости изменения показателя напряженного состояния в виде параметра  $\frac{d\eta}{de_n}$ . Если  $\frac{d\eta}{de_n}$  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  $\frac{d\eta}{de_n} < 0$  пластичность падает (по сравнению с величиной  $e_p$  определенной по диаграмме пластичности). Заметим, однако, что функция  $\eta = \eta(e_n)$  включает в себя переменность двух параметров – показателя  $\eta$  и кривизну траектории деформации  $H = 1/\rho$  (следуя терминологии А. А. Ильюшина). С тем, чтобы выделить влияние каждого параметра в работе [1] получены зависимости кривизны траектории деформаций  $\gamma = \gamma(e_z)$  от осевой деформации  $e_z$  для образцов, деформируемых в условиях сложной деформации  $\eta = 2,86 \cdot e_n$ ,  $\eta = \sqrt{e_n}$ ,  $\eta = e_n^2$ ,  $\eta = 1,4 \cdot e_n$ . При указанных траекториях кривизна траектории деформации меняется от  $H = 8$  до  $H = 0,5$ , величина предельных деформаций (см. рис. 2) слабо зависит от кривизны траектории деформаций. При этом показатель  $\eta$  меняется практически одинаково для путей деформирования  $\eta = 2,86 \cdot e_n$ ,  $\eta = \sqrt{e_n}$ . Совпадение фактических деформаций при разрушении образцов  $\eta = \sqrt{e_n}$  и  $\eta = 2,86 \cdot e_n$ , а также образцов  $\eta = e_n^2$  и  $\eta = 1,4 \cdot e_n$  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 зависят от механических свойств материала [1]. Это позволяет моделировать процессы обработки давлением на модельных материалах, в этом случае необходимо иметь кривые течения  $\sigma_n = f(e_n)$  и диаграммы пластичности  $e_p = f(\eta, \chi, \mu_\sigma)$  [5].

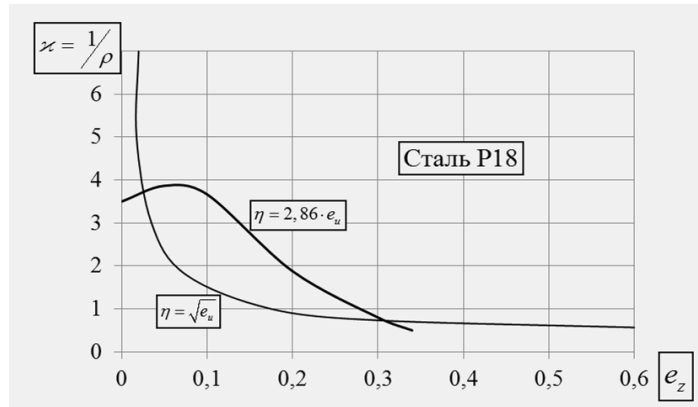


Рис. 2 – Зависимость кривизны траектории деформаций  $\zeta$  от осевой деформации  $e_z$  цилиндрических образцов, подвергаемых кручению совместно с растяжением [1]

Введем в рассмотрение коэффициент  $\omega$ , отражающий влияние скорости изменения показателя напряженного состояния на пластичность

$$\omega = \frac{e_p(\eta)}{e_p(\eta = const)} \quad (7)$$

В формуле (7)  $e_p(\eta)$  рассчитывают по критериям, или  $e_p(\eta)$  – отражает фактическую деформацию в момент разрушения;  $e_p(\eta = const)$  найдено по диаграмме пластичности в месте пересечения диаграммы пластичности с путем деформирования. Таким образом, коэффициент  $\omega$  отражает влияние истории деформирования на пластичность в условиях объемного напряженного состояния.

Расчет предельных деформаций по критериям (1), (2), и (3) показал, что если параметр  $\frac{d\eta}{de_{\text{н}}}$  возрастает, то растет отклонение фактических деформаций

в момент разрушения от расчетных по различным критериям. Так, если  $\frac{d\eta}{de_{\text{н}}}$

близко к нулю, все критерии дают одинаковый результат, отклонение от фактических деформаций лежат в пределах статистической погрешности, в случае, если  $\frac{d\eta}{de_{\text{н}}} > 5$  наиболее близки результаты расчета к экспериментальным дает критерий (3). Критерий (2) показывает отклонение до 25%, критерий (1) до 30%.

На рис. 3, 4 показаны зависимости коэффициента  $\omega$  от скорости изменения показателя напряженного состояния  $\frac{d\eta}{de_{\text{н}}}$  для быстрорежущих сталей

P9, P18 и стали 45, а также зависимости коэффициента  $\omega$  от кривизны деформирования  $\frac{d^2\eta}{de_u^2}$ .

Коэффициент  $\omega_1$  рассчитан по критерию (3), коэффициент  $\omega_2$  рассчитан по формуле (7), однако значение  $e_p(\eta)$  в числителе формулы (7) соответствует экспериментальным данным ( $e_p(\eta)$  в момент разрушения).

Как видим, графики на рис. (3, а) и (3, б) практически совпали, что подтверждает более высокую точность расчетов предельных деформаций по критерию (3).

Анализ данных, приведенных на рис. 3, 4 позволяет сделать вывод о существенном влиянии скорости изменения показателя напряженного состояния  $\frac{d\eta}{de_u}$  на пластичность. Так 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.

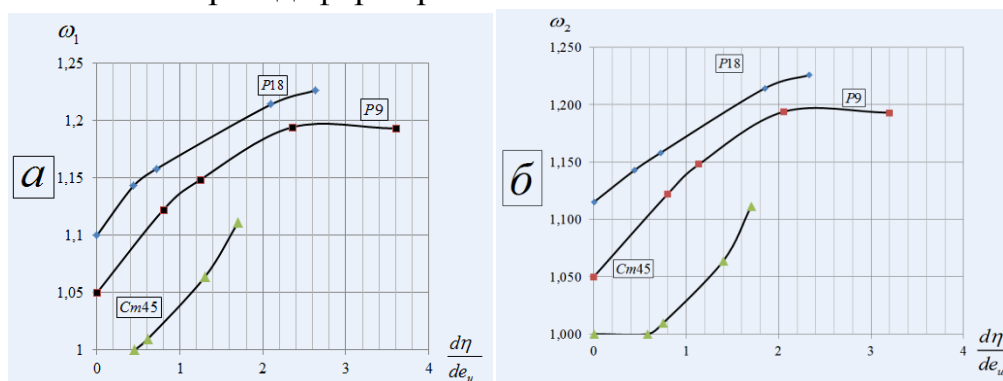


Рис. 3 – Влияние скорости изменения показателя напряженного состояния на пластичность в условиях объемного напряженного состояния

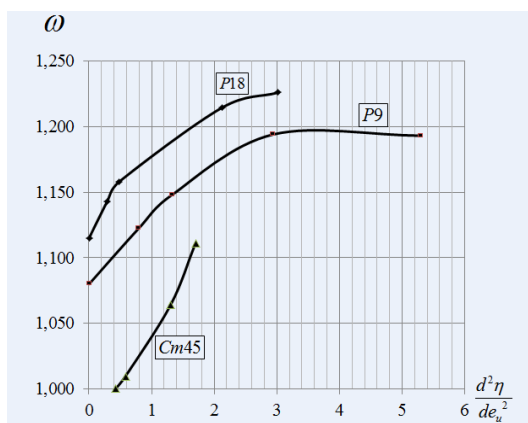


Рис. 4 – Влияние кривизны пути деформирования на пластичность в условиях объемного напряженного состояния

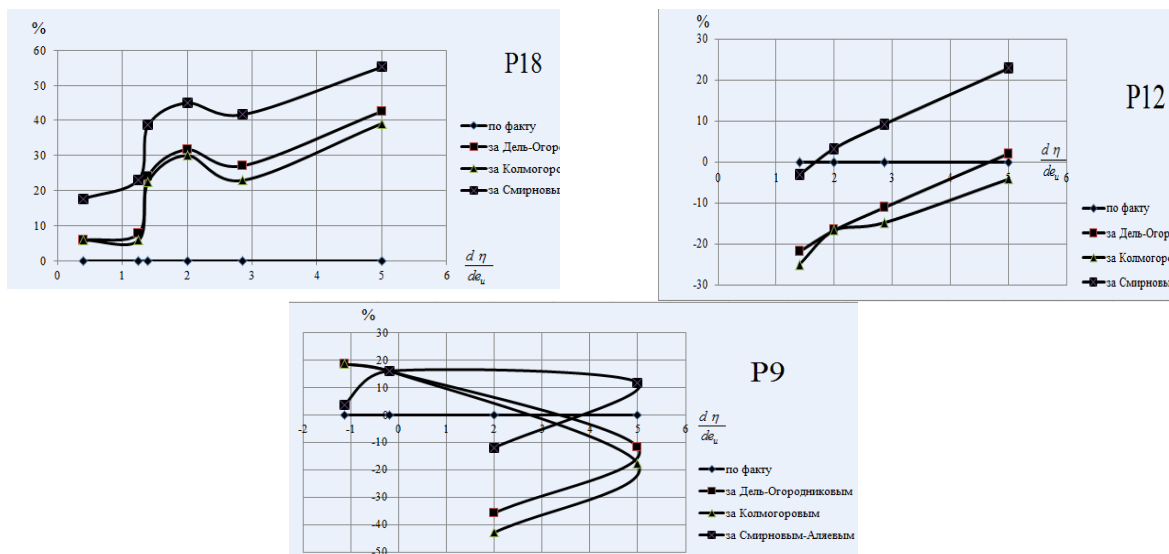


Рис. 5 – Результаты расчета по критериям (1), (2), (3), исходя из экспериментальных данных для прямых путей деформирования

На рис 5, 6 сопоставлены результаты расчета по критериям (1), (2), (3) с экспериментальными данными. Как следует из рис. 5, 6 наибольшее отклонение (55%) дает критерий Г. А. Смирнова-Аляева, минимальное отклонение дает критерий В. А. Огородникова (до 22%), критерий В. Л. Колмогорова до 45%.

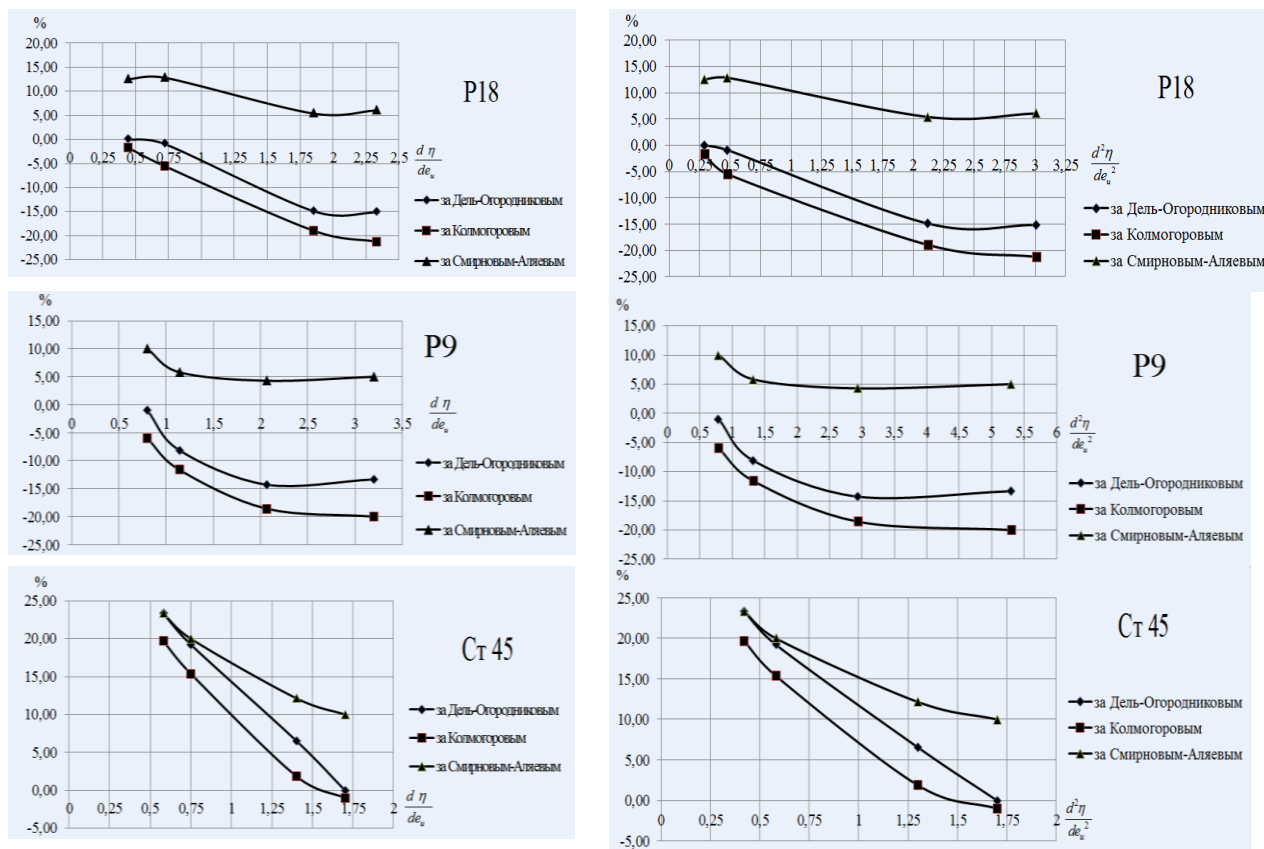


Рис. 6 – Результаты расчета по критериям (1), (2), (3), исходя из экспериментальных данных для кривых путей деформирования

**Применение критериев для процесса ротационной ковки.** Рассмотрим пример расчета использованного ресурса пластичности в процессе радиального обжатия. В процессе радиального обжатия металл находится в условиях объемного напряженного состояния. Сущность процесса заключается в деформировании заготовки коническими сходящимися штампами, обеспечивающими всестороннее пульсирующее приложение давлений. Благодаря благоприятной схеме напряженного состояния возможно обрабатывать заготовки из малопластичных, труднодеформируемых металлов и сплавов. Тем не менее, при определенных условиях деформирования заготовок из малопластичных материалов часто образуются трещины.

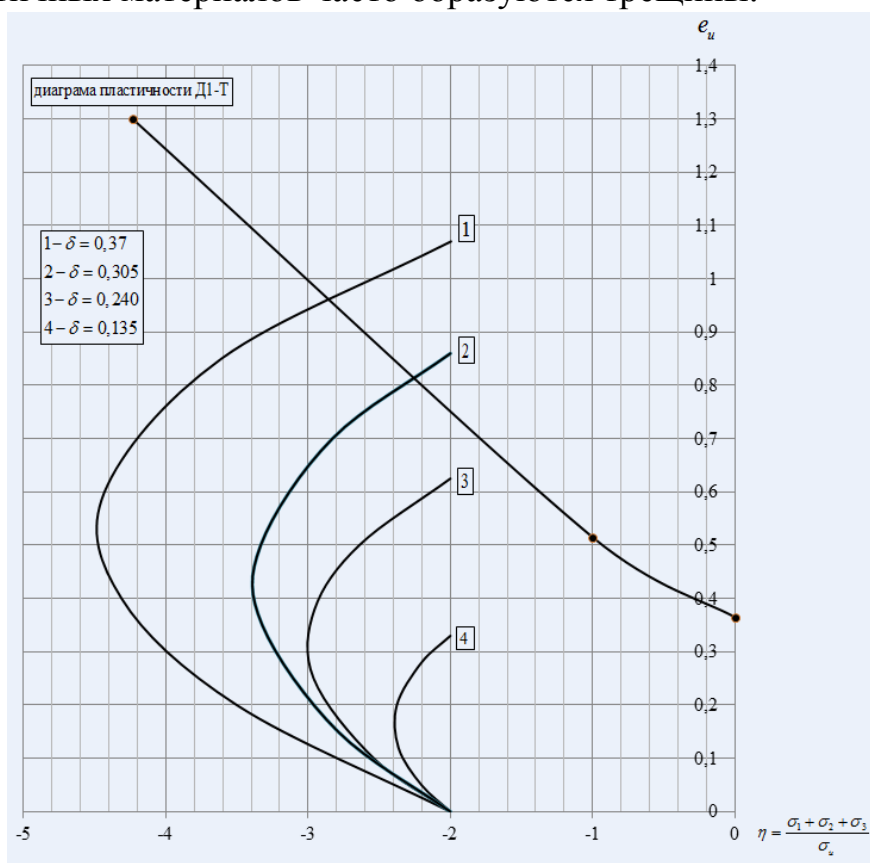


Рис. 7 – Пути деформирования частиц дюралюминия Д1-Т вдоль оси симметрии заготовок при ротационной ковке [1] (1, 2, 3, 4 – пути деформирования при разных обжатиях)

Экспериментально-расчетным методом твердости в работе [1] получены пути деформирования  $\eta = f(e_n)$  частиц материала заготовок в опасной области

для различных обжатий  $\delta = \frac{d_0 - d}{d_0} = 0,135, \delta = 0,24, \delta = 0,305, \delta = 0,37$  ( $d_0, d$  – диаметр прутка до и после деформирования,  $d_0=20$  мм).

На рис. 7 показаны пути деформирования  $\eta = f(e_n)$ , построенные для различных обжатий (кривые 1–4). Зависимости  $\eta = f(e_n)$  аппроксимированы выражением

$$\eta = a \cdot e_n^2 + b \cdot e_n + c, \quad (8)$$



в котором  $a, b, c$  – коэффициенты аппроксимации.

Использованный ресурс пластичности  $\psi$  рассчитывали по критериям деформируемости (1), (2), (3). Анализ результатов расчета величины  $\psi$  по критериям (2) и (3) показал, что история деформирования при радиальном обжатии оказывает значительное влияние на предельную деформацию. В таблице приведены результаты расчета использованного ресурса пластичности  $\psi$  в зависимости от обжатия.

При обжатии  $\delta = 0,37$  у заготовки травлением поперечного шлифа обнаружена трещина, что подтверждено расчетом  $\psi$  по критерию (3).

Таблица – Результаты расчета использованного ресурса пластичности  $\psi$  в зависимости от обжатия

Материал	Обжатие $\delta$	Ресурс $\psi$	Расчетное значение ресурса пластичности			
			Расчет по (1)	$\Delta\%$	Расчет по (3)	$\Delta\%$
Дюралюминий Д1-Т	0,135	0,515			0,313	
	0,240	0,940			0,613	
	0,30	1,273			0,805	
	0,37	1,00 (трещина в центре заготовки)	1,621	62	0,981	1,6

**Выводы.** В условиях объемного напряженного состояния на пластичность оказывает влияние скорость изменения показателя напряженного состояния  $\frac{d\eta}{de_n}$ , а также кривизна пути деформирования  $\frac{d^2\eta}{de_n^2}$ . С увеличением параметра  $\frac{d\eta}{de_n}$  пластичность возрастает по сравнению с диаграммой пластичности, построенной в условиях  $\eta = const, \chi = const$ .

Максимальное значение коэффициента влияния истории деформирования на пластичность достигает при значениях параметра  $\frac{d\eta}{de_n} > 2$ , при этом

кривизна пути деформирования достигает  $\frac{d^2\eta}{de_n^2} > 3$  для быстрорежущих сталей

и  $\frac{d^2\eta}{de_n^2} > 2$  для стали 45.

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

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

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

**Список литературы:** 1. Огородников В. А. Оценка деформируемости металлов при обработке давлением / В. А. Огородников – Киев: Вища школа. Главное изд-во, 1983. – 175с. 2. Смирнов-Аляев Г.А. Механические основы пластической обработки металлов / Г.А. Смирнов-Аляев. – Л.: Машиностроение, 1962. – 271с. 3. Колмогоров В.Л. Напряжения. Деформации. Разрушение / В.Л. Колмогоров – М.: Металлургия, 1970. – 272 с. 4. Ильющин А.А. Труды (1946-1966). Т .2. Пластичность /Составители Е.А.Ильющина, М.Р.Короткина. – М.:Физмат. лит. 2004 – 480с. – ISBN5-9221-0364-4. 5. Огородников В.А. Моделирование процессов обработки давлением на основе гипотезы о силовом и кинематическом подобии параметров деформирования / В. А. Огородников, А.В.Грушко, И.А. Деревенько // Обработка материалов давлением, сб. научных трудов, №4(33) 2012, Краматорск, ДТМА – с. 46-52. 6. Сивак И.О. Пластичность металла при плоском напряженном состоянии / И.О. Сивак // В сб. научн. тр. Совершенствование процессов и оборудования обработки давлением в металлургии и машиностроении. – Вып. 4. – Краматорск, 1998. – с.254 – 257.

**Bibliography (transliterated):** 1. Ogorodnikov V. A. Otsenka deformiruемости metallov pri obrabotke davleniem / V. A. Ogorodnikov – Kiev: Vischa shkola. Glavnoe izd-vo, 1983. – 175 P. 2. Smirnov-Alyayev G.A. Mehanicheskie osnovyi plasticheskoy obrabotki metallov / G.A. Smirnov-Alyayev. – Leningrad: Mashinostroenie, 1962. – 271 P. 3. Kolmogorov V.L. Napryazheniya. Deformatsii. Razrushenie / V.L. Kolmogorov – Moscow: Metallurgiya, 1970. – 272 P. 4. Ilyushin A.A. Trudyi (1946-1966). T .2. Plastichnost /Sostaviteli E.A.Ilyushina, M.R.Korotkina. – Moscow: Fizmat. lit. 2004 – 480 P. 5. Ogorodnikov V.A. Modelirovanie protsessov obrabotki davleniem na osnove gipotezyi o silovom i kinematicheskom podobii parametrov deformirovaniya / V. A. Ogorodnikov, A.V.Grushko, I.A. Derevenko // Obrabotka materialov davleniem, sb. nauchnyih trudov, No 4(33) – 2012, Kramatorsk, DTMA – P. 46–52. 6. Sivak I.O. Plastichnost metalla pri plokome napryazhennom sostoyanii / I.O. Sivak // V sb. nauchn. tr. Sovershenstvovanie protsessov i oborudovaniya obrabotki davleniem v metallurgii i mashinostroenii. – Vyip. 4. – Kramatorsk, 1998. – P. 254–257.

Поступила(received) 04.11.2014