

УДК 621. 7: 519.85

Огородников В. А.
Алиева Л. И.
Кожушаный В. М.
Деревенько И. А.

ПАРАМЕТРЫ МОДЕЛИ, ФОРМИРУЮЩЕЙ КАРТУ МАТЕРИАЛА В ПРОЦЕССАХ ОБРАБОТКИ ДАВЛЕНИЕМ

Метод конечных элементов в настоящее время широко применяется при компьютерном моделировании процессов обработки давлением, а также является эффективным средством моделирования аварийных разрушений конструкций.

Проблемным вопросом используемых в механике твердого тела конечно-элементных программ таких, например, как Pam Stamp / Pam Crach, Abakus, Lg-Dyna, Radios, Autoform и др. является информация о механических свойствах материалов. Модели материала математически описывают реакцию материала на различные воздействия. Модель материала формирует так называемый паспорт материала (иногда применяют термин «карта» материала [3]).

Карта материала включает различные функции, отражающие поведение материала в различных условиях его деформирования – растяжение, сжатие, двухосное растяжение, сдвиги, испытание материала в камере высокого давления и т. д. Параметрами модели материала являются различные аппроксимирующие функции, однако описание этих функций в виде аппроксимирующих выражений, имеющих физический смысл, слабо отражено в технической литературе. Кроме того, практическое применение полученных экспериментально результатов испытаний материалов различными авторами [1–7] затруднено, т. к. в указанных работах аппроксимации не имеют физического смысла [3, 7], а в работах [4–6] отражены данные лишь о сталях. Феноменологическая теория деформируемости металлов включает в себя деформационные критерии разрушения, позволяющие оценивать либо предельные до разрушения деформации (пластичность), либо использованный ресурс пластичности $\psi = \leq 1$, который зависит не только от уровня достигнутых деформаций и схемы напряженного состояния, но и от истории деформирования. В основу этих критериев положены экспериментальные данные о пластичности металлов и сплавов, зависящие от безразмерных показателей напряженного состояния. Указанные зависимости принято называть диаграммами пластичности (или диаграммами предельных деформаций).

Целью данной работы является обеспечение экспериментальными данными модели, запрограммированными в упомянутых выше программах, и представление этих данных в виде параметров, имеющих физический смысл. Последнее позволит на основе коэффициентов аппроксимаций моделей сделать выводы о технологичности различных операций холодной обработки давлением и обеспечить качество готовых изделий.

Диаграммы пластичности.

Среди многочисленных моделей материала остановимся на диаграммах пластичности. Указанные диаграммы и являются объектом дальнейших исследований – зависимость накопленной предельной пластической деформации от показателей напряженного состояния для класса процессов простого деформирования.

Величину накопленной предельной интенсивности деформации оцениваем параметром Одквиста (предельная деформация):

$$\varepsilon_p(t) = \int_0^{t_p} \dot{\varepsilon}_1 dt, \quad (1)$$

где $\dot{\varepsilon}_1$ – интенсивность скоростей деформаций. В качестве показателя напряженного состояния примем следующие выражения:

$$\eta_1 = \frac{I_1(T\sigma)}{\sqrt{3I_2(D\sigma)}} = \frac{\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3}{\sigma_i}; \quad (2)$$

$$\eta_2 = \frac{\sqrt[3]{I_3(T\sigma)}}{\sqrt{3I_2(D\sigma)}} = \frac{\sqrt[3]{\sigma_1\sigma_2\sigma_3}}{\sigma_i}. \quad (3)$$

Показатель η_1 предложен в работах Г. А. Смирнова-Аляева [5], показатель η_2 – в работах В. А. Огородникова [1, 2].

Показатель η_2 учитывает влияние третьего инварианта тензора напряжений на пластичность (предельную деформацию). В работах [1, 2] показано, что при прочих равных условиях наличие третьего инварианта тензора напряжений на пластичность оказывает влияние на вид диаграммы пластичности. Так опытами $p + m + q$ (сила, крутящий момент, давление) показано, что диаграмма пластичности $\varepsilon_p(\eta_1)$ не совпадает с диаграммой $\varepsilon_p(\eta_2)$. Иначе говоря, следует строить объемную диаграмму пластичности в координатах $\varepsilon_p(\eta_1, \eta_2)$.

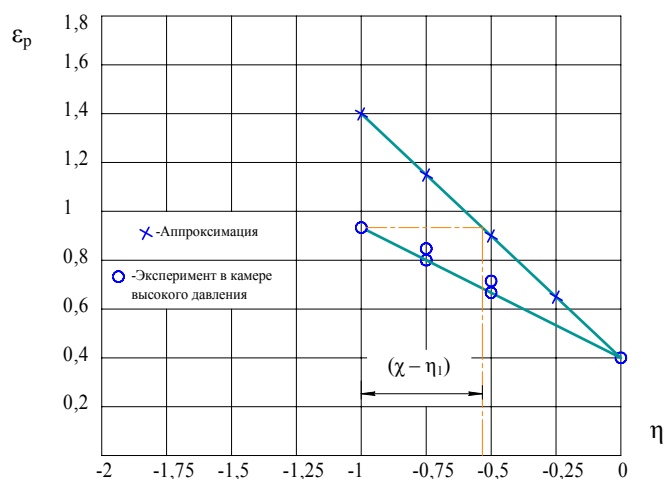


Рис. 1. Диаграмма пластичности стали Р9, построенная в условиях наложения гидростатического давления $\varepsilon_p(\eta_2)$ и без давления $\varepsilon_p(\eta_1)$

Двумерную диаграмму пластичности можно свести к одномерной, если ввести показатель χ :

$$\chi = \eta_1[1 + f(\eta_1) + \eta_2]. \quad (4)$$

Функция $f(\eta_1)$ оказалась практически не зависимой от свойств материалов (эксперименты проводили в камере высокого давления на материалах: сталь 45, дюралюминий Д1Т, сталь 40Х, стали Р9, Р18).

Вид функции в работе [1] представлен в виде:

$$f(\eta_1) = A\eta_1^2 + B\eta_1 + C, \quad (5)$$

где коэффициенты аппроксимации:

$A = -4,1$ (сталь 40 X), $-3,1$ (сталь 45);

$B = -6,89$ (сталь 40 X), $-9,89$ (сталь 45);

$C = -6,89$ (сталь 40 X), $-9,89$ (сталь 45).

Представим (5) в виде:

$$f(\eta_1) = \frac{\chi - \eta_1}{\eta_1\eta_2}. \quad (6)$$

Таким образом, с помощью диаграмм пластичности с привлечением формулы (3) можно оценить поправку, связанную с влиянием $I_3(T\sigma)$ на величину ε_p . Предельную деформацию в случае изучения процессов, сопровождающихся объемным напряженным состоянием можно определять по разности показателей $\eta_1 - \chi$ (см. рис. 1). При этом показатель η_1 находится в пределах $0 \geq \eta_1 \geq -2$. Подобный подход не требует построения пространственных диаграмм пластичности и необходимости проведения дополнительных экспериментов в камере высокого давления.

Привлекая феноменологические деформационные критерии деформируемости [1, 2] ресурс пластичности в процессах обработки металлов давлением, сопровождающимся объемной схемой напряженного состояния, можно рассчитать по критерию:

$$\psi = \int_0^{\dot{\varepsilon}_p} \left(1 + 0,2 \operatorname{arctg} \frac{d\eta_2}{d\varepsilon_i} \right) \frac{\varepsilon_i(\eta_2)^{0,2 \operatorname{arctg} \frac{d\eta_2}{d\varepsilon_i}} d\varepsilon_i}{[\dot{\varepsilon}_p(\eta_2)]^{1+0,2 \operatorname{arctg} \frac{d\eta_2}{d\varepsilon_i}}} \leq 1, \quad (7)$$

где $\varepsilon_i(\eta_2)$ – путь деформирования частицы материала в процессах обработки давлением, $\frac{d\eta_2}{d\varepsilon_i}$ – «направление деформирования» в пространстве $\varepsilon_i(\eta_2)$, $\varepsilon_p(\eta_2)$ – диаграмма пластичности, учитывающая влияние $I_3(T\sigma)$ на пластичность.

Аппроксимация диаграмм пластичности.

Среди многочисленных аппроксимаций диаграмм пластичности [1–2, 6–7, 11] остановимся на тех, у которых коэффициенты аппроксимации имеют физический смысл. Так в работах [1, 2] приведена аппроксимация вида:

$$\varepsilon_p(\eta) = \varepsilon_p(\eta = 0) \exp(-\lambda_i \eta). \quad (8)$$

Здесь коэффициент λ_i равен:

$$\lambda_1 = \ln \frac{\varepsilon_p(\eta = 0)}{\varepsilon_p(\eta = 1)}. \quad (9)$$

Его использование в уравнении (8) необходимо в пределах изменения показателя $1 \geq \eta_1 \geq 0$. Для интервала изменения показателя $0 \geq \eta_1 \geq -1$ рассчитывают коэффициент:

$$\lambda_2 = \ln \frac{\varepsilon_p(\eta = -1)}{\varepsilon_p(\eta = 0)}. \quad (10)$$

В полулогарифмических координатах λ_i – тангенсы угла наклона прямых, построенных в координатах $\varepsilon_p(\eta)$. Коэффициенты λ_i – это по существу коэффициенты чувствительности пластичности к изменению схемы напряженного состояния.

Чем больше эти коэффициенты, тем интенсивнее происходит рост пластичности с возрастанием гидростатического давления. Подобное представление позднее опубликовано в монографии В. А. Скуднова [11], в которой с точки зрения физики металлов показана целесообразность введения коэффициентов «чувствительности» пластичности к изменению показателя η . Так в указанной работе перегибы на диаграммах пластичности, построенных в полулогарифмических координатах, связаны с показателем релаксационной способности (пластичности) поликристаллов m :

$$m = \frac{\ln \frac{\sigma_2}{\sigma_1}}{\dot{\varepsilon}_2 - \dot{\varepsilon}_1}; \quad (11)$$

$$m = \frac{KT}{U(\tau_{эф})}. \quad (12)$$

$m = \frac{d \ln \sigma}{d \ln \dot{\varepsilon}}$ – показатель релаксационной способности (пластичности) поликристаллов – показатель чувствительности напряжения течения (σ_u или τ_u) к скорости деформации изменения времени, а величины $\varepsilon_{пред}$, δ , ψ есть следствие величины m (но только ее одной).

Практическое применение диаграмм пластичности, аппроксимированных уравнениями, имеющими физический смысл.

Физическая сущность коэффициентов аппроксимаций уравнения (8), в котором «чувствительность» пластичности к изменению схемы напряженного состояния объясняет факты обрабатываемости материалов при резании металлов. Так в работе [8] впервые получено распределение напряжений в зоне резания металлов методом твердости.

Данные о напряженно – деформированном состоянии в зоне резания, например, латуни Л62 и ЛС59-1 представлены в работе [9] в виде путей деформирования в координатах: интенсивность деформаций ε_i – показатель напряженного состояния $\eta_i = \frac{\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3}{\sigma_i}$.

Наложение указанных путей деформирования полученных при резании латуни ЛС59-1 резцом с передним углом $\gamma = 39^\circ$, а также латуни Л62 резцом с передним углом $\gamma = 8^\circ 30'$ на диаграммы пластичности указанных материалов дает возможность прогнозировать: будет ли процесс резания сопровождаться сливной либо элементной стружкой. В данном случае диаграммы пластичности, являющиеся по существу своеобразной характеристикой материала, позволяют оценивать его обрабатываемость.

Введенные в наших работах [1, 2] коэффициенты чувствительности пластичности к изменению схемы напряженного состояния дают возможность сделать вывод об ожидаемом виде стружкообразования. Так, если $\lambda_2 > 0,3$, при резании образуется сливная стружка, а если $\lambda_2 < 0,18$ – элементная.

Другим примером использования диаграмм пластичности в виде аппроксимаций, имеющих физический смысл, является процесс чистовой вырубке-пробивки [10]. При чистовой вырубке клиновый прижим в зоне среза способствует увеличению гидростатического давления, что в свою очередь способствует повышению пластичности в зоне среза. Однако способность листовых материалов подвергаться чистовой вырубке зависит от показателя их «восприимчивости» гидростатического давления. Способы оценки пригодности листовых материалов подвергается чистовой вырубке (например, испытанием на растяжение, либо кручение) не учитывают изменения показателя напряженного состояния в зоне среза. В работе [1] предложено: способность материала подвергается чистовой вырубке оценивать параметром λ_2 .

Так, если параметр $\lambda_2 > 0,8$ (это соответствует отношению величины блестящего пояса Δs при срезе к толщине заготовки s ($\frac{\Delta s}{s} \times 100\%$) около 60%) – материал способен подвергается чистовой вырубке. При $\lambda_2 < 0,8$ ($\frac{\Delta s}{s} \approx 50\%$) – материал хуже подвергается чистовой вырубке.

Для всех исследованных в работе [1] материалов, в случае, если $\lambda_2 > 1$ получаем величину $\frac{\Delta s}{s}$ около 100%. Для материалов, у которых $\lambda_2 < 1$, величина $\frac{\Delta s}{s}$ лежит в пределах $75\% \geq \frac{\Delta s}{s} \geq 50\%$.

Анализ данных, полученных в работе [1], позволяет отметить, что латунь ЛС591, сплав на ниобий-титановой основе, дюралюминий Д16Т практически не пригодны для чистовой вырубке, т. к. диаграммы пластичности этих материалов обладают малой крутизной,

т. е. не чувствительны к изменению показателя напряженного состояния. В то же время для чистовой вырубki стали Ст3 достаточно применение плоского прижима т. к. незначительное «смягчение» схемы напряженного состояния в области среза заготовки из этой стали ведет к существенному увеличению пластичности.

В табл. 1 приведены экспериментальные данные, полученные в лабораториях Винницкого национального технического университета и Томского политехнического института. Испытанию подвергали как плоские, так и цилиндрические образцы из металлов. Также приведены данные о предельных деформациях в условиях растяжения ($\eta_1 = 1$), кручения, сдвига для плоских образцов ($\eta_1 = 0$) и сжатия в условиях одноосного напряженного состояния ($\eta_1 = -1$). Следует заметить, что легированные стали имеют меньший разброс экспериментальных данных, чем углеродистые.

В табл. 1 приведены также коэффициенты аппроксимации уравнения (8) λ_1 и λ_2 . Аппроксимация (8) проверена испытанием материалов на машине ZDMU-30 в условиях $\eta_1 = const$ [1].

При построении диаграмм пластичности в условиях $\eta_1 = 0$ (сдвиг) закручивали цилиндрический образец до разрушения. На цилиндрической образующей сплошного круглого образца наносили риску алмазной пирамидой. Образец доводили до разрушения, угол γ между искривленной риской и продольной осью образца измеряли на инструментальном микроскопе. Предельная деформация равна:

$$\varepsilon_{p(\eta_1=0)} = \frac{tg\gamma}{\sqrt{3}}. \quad (13)$$

При сжатии со смазкой (коллоидный графит и глицерин) цилиндрического образца с соотношением высоты к диаметру $\frac{h_0}{d_0} = 1,5$ до разрушения (появление первой макротрещины, видимой невооруженным глазом). Предельная деформация при этом равна:

$$\varepsilon_{p(\eta_1=-1)} = 2 \ln \frac{d_i}{d_0} = \ln \frac{h_0}{h_i}, \quad (14)$$

где d_0, h_0, d_i, h_i – высота и диаметры образца до и после осадки соответственно. В условиях одноосного растяжения:

$$\varepsilon_{p(\eta_1=1)} = \ln \frac{F_0}{F_{yct.}}, \quad (15)$$

где $F_0, F_{yct.}$ – площади поперечного сечения образца до деформации и на некотором удалении от минимальной площади шейки [12].

Таблица 1

Экспериментальные данные для построения диаграммы пластичности

№ п/п	Марка материала	Данные для построения диаграммы пластичности			Коэффициенты чувствительности пластичности для показателя η	
		$\varepsilon_{p(\eta_1=1)}$	$\varepsilon_{p(\eta_1=0)}$	$\varepsilon_{p(\eta_1=-1)}$	$\lambda_1 = \ln \frac{\varepsilon_p(\eta_1=0)}{\varepsilon_p(\eta_1=1)}$	$\lambda_2 = \ln \frac{\varepsilon_p(\eta_1=-1)}{\varepsilon_p(\eta_1=0)}$
1	2	3	4	5	6	7
1.	ВТ-1	0,64	1,15	2,9	0,58	0,92
2.	P12	0,17	0,55	1,9	1,17	1,236

Продолжение таблицы 1

1	2	3	4	5	6	7
3.	P6M5	0,23	0,46	0,95	0,69	0,72
4.	20-A	1	1,3	1,7	0,26	0,25
5.	АМГ-2	1,05	1,57	2,25	0,4	0,35
6.	ВТ14	0,15	0,64	1,3	1,45	0,7
7.	P18	0,03	0,37	1,16	2,5	1,14
8.	P9	0,1	0,48	1,2	1,56	0,91
9.	40ХН2МА	0,48	0,76	1,52	0,45	0,69
10.	Сталь40	0,09	0,37	∞	1,4	∞
11.	ОТ-4	0,35	0,75	1,6	0,762	0,757
12.	40X	0,08	0,86	1,5	2,37	0,556
13.	30ХМА	0,31	0,48	2,0	0,43	1,42
14.	Ст35	0,2	0,53	1,63	0,97	1,1
15.	О8КП	0,355	0,5	0,7	0,342	0,336
16.	У8А	0,03	0,39	1,2	2,56	1,12
17.	13М5-А	0,28	0,38	0,9	0,305	0,862
18.	ХН70ВМТЮ	0,38	0,68	1,1	0,58	0,481
19.	ХН77ТЮР	0,29	0,62	0,96	0,76	0,437
20.	ЛС59-1	0,4	0,55	0,65	0,318	0,176
21.	ШХ-15	0,2	0,52	1,8	2,6	1,24
22.	Д-1	0,3	0,47	0,5	0,2	0,3
23.	30ХГСА	0,75	1,05	1,45	0,33	0,32
24.	Ст3	0,25	0,36	∞	0,365	∞
25.	СтЮ	0,3	0,67	2,67	0,803	1,38
26.	40Х13	0,35	0,84	3,3	0,875	1,37
27.	АВ	1,25	2,25	3,5	0,59	0,44
28.	ЛС62	0,45	1,1	1,5	0,894	0,31
29.	Ст45	0,15	0,4	1,1	0,981	1,01
30.	Д16Т	0,08	0,42	0,9	1,66	0,762
31.	Х18Н9Т	0,38	0,76	1,6	0,693	0,744
32.	Ст20	0,32	0,62	1,23	0,66	0,685
33.	АМГ5В	0,735	1,0	1,25	0,31	0,223
34.	Д16	0,875	1,25	1,625	0,36	0,262
35.	Ст35	0,25	0,534	1,63	0,76	1,12
36.	Л62	0,4	0,59	1,75	0,39	1,09
37.	У8А (2 партия)	0,255	0,39	1,2	0,425	1,12
38.	Д16 (2 партия)	0,10	0,41	1,5	1,46	1,30
39.	Ст20 (2 партия)	0,3	0,65	1,25	0,773	0,654
40.	Ст10 (2 партия)	0,32	0,65	1,42	0,710	0,780
41.	Ст38Х2МЮА	0,55	0,75	1,30	0,30	0,551
42.	Ст38Х2МЮА термообработанная	0,485	0,74	1,00	0,42	0,30
43.	Ст30Х3МФА	0,74	0,85	1,13	0,14	0,28
44.	Ст30Х3МФА термообработанная	0,74	0,85	1,13	0,11	0,92

Обоснование аппроксимации (8) с позиции физики металлов.

Впервые на то, что мерой пластичности, как способности к деформации, является время (скорость) релаксации напряжений указал Максвелл. В работе [11] показано то, что релаксация напряжений подчиняется зависимости:

$$\sigma_t = \sigma_0 \exp\left(\frac{-t}{t_p}\right) = \sigma_0 \exp(-V_p^0 t), \quad (13)$$

где σ_0, σ_t – приложенное напряжение в начальный и текущий моменты времени;

$t_0 = 0, t_p = \frac{1}{V_p^0}$ – время релаксации, в течение которого напряжение падает в $-2,71$ раза;

$V_p^0 = \frac{1}{\eta} \approx \frac{G}{\eta}$ – константа скорости относительного убывания напряжений, т. е. скорость

релаксации в единицу времени; G – модуль упругости, η – коэффициент вязкости.

Величина времени релаксации может являться мерилем пластичности (хрупкости) твердых тел: чем больше время релаксации (чем ниже V_p^0), тем медленнее упругая деформация переходит в пластическую и тем более хрупко данное вещество, и наоборот, повышение температуры, производит действие, подобное понижению скорости деформации, меньших скорости релаксации $\varepsilon < V_p^0$ тело вязкое и, наоборот, при $\varepsilon > V_p^0$ тело оказывается упругим и хрупким. После логарифмирования, получим:

$$V_p^0 = \frac{\ln \frac{\sigma_1}{\sigma_2}}{t_2 - t_1} \approx c \cdot m = \frac{\lg\left(\frac{\sigma_2}{\sigma_1}\right)}{\dot{\varepsilon}_2 - \dot{\varepsilon}_1}, \quad (14)$$

где m – показатель чувствительности напряжения к изменению времени (скорости) нагружения, пропорционален V_p^0 ; c – коэффициент пропорциональности. Отсюда следует, что показатель m является одним из физических критериев пластичности металлов. Таким образом, показатель $m = \frac{d \ln \sigma}{d \ln \dot{\varepsilon}}$ – показатель чувствительности напряжения течения к скорости деформации, а величины $\varepsilon_p, \delta, \psi$ – есть следствие величины m .

Показатель m – связан с основными дислокационными и диффузионными механизмами релаксации напряжений, подвижности дислокаций. Поэтому величина m контролирует скорость пластической деформации большинства ГЦК, ГП и ОЦК металлов и сплавов в процессе холодной обработке металлов давлением.

ВЫВОДЫ

Показано, что аппроксимация диаграмм пластичности уравнениями, коэффициенты которых имеют физический смысл, позволяет прогнозировать обрабатываемость (в условиях резания металлов), оценивать способность материалов подвергаться чистовой вырубке и другие технологические свойства обрабатываемых материалов.

Показано, что коэффициенты аппроксимации диаграмм пластичности имеют физический смысл и определяют суть меры пластичности, отражающей время (скорость) релаксации напряжений. Показатель чувствительности напряжения течения к изменению времени (скорости) нагружения m аналогичен количественной мере пластичности (предельной деформации), зависящей от показателей напряженного состояния большинства поликристаллов.

Приведены экспериментальные данные о пластичности (предельных до разрушения деформациях) 44 металлов и сплавов в условиях растяжения ($\eta_1 = +1$), сдвига ($\eta_1 = 0$), сжатия ($\eta_1 = -1$), а также коэффициенты чувствительности пластичности к изменению показателей напряженного состояния λ_i для 44 сталей, известных металлов и сплавов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Огородников В. А. Оценка деформируемости металлов при обработке давлением / В. А. Огородников. – К. : Вища шк., 1983 – 175 с.
2. Огородников В. А. Деформируемость и разрушение металлов при пластическом формоизменении / В. А. Огородников. – К. : УМК ВО, 1989 – 152 с.
3. Елисеев В. В. Экспериментальное построение диаграмм предельных деформаций листовых материалов / В. В. Елисеев // Теория и практика машиностроительного оборудования : межвузовский сборник. – Воронеж, 2003. – Выпуск 13. – С. 180–188.
4. Хван Д. В. Повышение эффективности в обработке давлением / Д. В. Хван. – Воронеж : изд-во Воронежского университета, 1995. – 224 с.
5. Смирнов-Аляев Т. А. Механические основы пластической обработки металлов / Т. А. Смирнов-Аляев. – Л. : Машиностроение, 1978. – 368 с.
6. Определение параметров моделей, формирующих паспорт материалов в процессах обработки давлением / Е. В. Солая, И. А. Деревенько, В. А. Федотов, В. Е. Перлов // Зб. наук. пр. ВДАУ. – Вінниця, 2010. – Випуск 6. – С. 3–10. – (Серія : «Технічні науки»).
7. Михалевич В. М. Аппроксимация кривых предельной деформации сплайн – функциями / В. М. Михалевич, Л. И. Алиева // Обработка материалов давлением : сб. научных трудов. – Краматорск : ДГМА, 2010. – № 3 (24). – С. 3–10.
8. Дель Г. Ф. Определение напряженного состояния в зоне резания / Г. Ф. Дель, М. Г. Гольдсмит // Изв. вузов. Черная металлургия. – 1969. – № 18. – С. 45–49.
9. Дель Г. Д. Определение напряжений в пластической области по распределению твердости / Г. Д. Дель. – М. : Машиностроение, 1971. – 200 с.
10. Бирюков В. П. Чистовая вырубка / В. П. Бирюков, Н. С. Вишневицкий, А. Г. Овчинников. – М. : Машиностроение, 1974. – 43 с.
11. Скуднов В. А. Предельные пластические деформации металлов / В. А. Скуднов. – М. : Металлургия, 1989. – 176 с.
12. Огородников В. А. Диаграммы пластичности и особенности их построения / В. А. Огородников, И. Ю. Кирица, В. И. Музычук // Удосконалення процесів і обладнання обробки тиском в металургії і машинобудуванні : темат. зб. наук. пр. – Краматорськ, 2006. – С. 231–255.

Огородников В. А. – д-р техн. наук, проф., зав. кафедрой ВНТУ;

Алиева Л. И. – канд. техн. наук, ст. преп. кафедры ОМД ДГМА;

Кожушаний В. М. – судебный эксперт – автотоваровед ИП ЭНИЦ «Экспертиза»;

Деревенько И. А. – аспирант ВНАУ.

ВНТУ – Винницкий национальный технический университет, г. Винница;

ДГМА – Донбасская государственная машиностроительная академия, г. Краматорск;

ИП ЭНИЦ «Экспертиза» – ИП ЭНИЦ «Экспертиза», г. Винница;

ВНАУ – Винницкий национальный аграрный университет, г. Винница.

E-mail: vaogorodnikov@ukr.net