

УДК 621.919

А.В. Грушко, к. т. н.
Винницький національний технічний університет

ОПРЕДЕЛЕНИЕ КРИВОЙ ТЕЧЕНИЯ МАТЕРИАЛА ПО СТАНДАРТНЫМ МЕХАНИЧЕСКИМ ХАРАКТЕРИСТИКАМ

Запропоновано методи побудови кривих течій на основі стандартних механічних характеристик матеріалу - границі міцності, текучості та твердості за Брінелем. Апроксимація кривих течій прийнята у вигляді степеневі функції за П. Людвигом. Показано особливості методів та їхню достатню точність. Спосіб побудови кривої може бути використаний при оцінці питомої енергії деформування при експертизах дорожньо-транспортних пригод.

The methods of tracing of flow curves on the basis of the standard mechanical characteristic of material such as yield stress, tensile strength and Brinell hardness is offered. Approximation of flow curves is accepted as a power law by P.Ludwig. The features of methods and its sufficient exactness are demonstrated. The methods of construction of the curve can be used for the estimation of specific energy of deformation in the process of traffic accidents examinations .

В расчетах процессов обработки металлов давлением (ОМД) применяются кривые течения материала, представляющие зависимости интенсивности нормальных напряжений и интенсивности логарифмических деформаций $\sigma_i = f(e_i)$ [1, 2]. Кривые течения при таких расчетах обычно аппроксимируют различными функциями, в зависимости от особенностей поведения материала, желанием получить наиболее точное решение и возможностью математических преобразований для получения конечных выражений. На наш взгляд, как в экспериментально-теоретических так и численных расчетах при деформациях существенно превышающих деформацию предела текучести, достаточную точность для большинства квазимонотонных процессов обработки давлением дает степенная аппроксимация [1, 2]

$$\sigma_i = A e_i^n, \quad (1)$$

где A и n – эмпирические коэффициенты – модуль и показатель упрочнения материала соответственно;

σ_i , e_i – интенсивность напряжений и деформаций (истинное напряжение и деформация).

Сведения о кривых течения приводятся в специальной литературе для сравнительно небольшого количества материалов [1-3]. Для большинства конструкционных материалов обычно известны данные о пределе текучести, прочности; твердости по Бринеллю и прочие стандартные характеристики. Указанные величины тесно связаны с поведением материала при его пластическом деформировании, поэтому их можно использовать для определения кривой течения материала, без проведения трудоемких испытаний [4, 5]. Такие методы становятся особенно актуальны, когда отсутствует возможность получить необходимые образцы для проведения испытаний. Например, при обработке ранее полученных экспериментальных данных с неизвестными кривыми течения, а также, когда исключается возможность вырезания образцов из исследуемой конструкции.

Отметим, что кривые течения достаточно сильно зависят от термообработки материала и партии поставки, т.е. они являются среднестатистическими. В справочниках приводится преимущественно информация для отожженного металла. Для состояния поставки и термообработки чаще приводятся стандартные механические характеристики материала.

Целью работы является разработка и проверка метода определения эмпирических коэффициентов A и n кривой течения материала (сталей) в зависимости от его стандартной твердости HV , предела прочности и предела текучести.

Способ измерения твердости

Связь твердости с кривой течением материала получена в [5] с использованием конечноэлементного моделирования явным методом при таких условиях: характеристики материала – коэффициент Пуассона $\mu = 0,3$, модуль Юнга $E = 210$ ГПа, коэффициент трения между шариком и поверхностью по Кулону $f = 0,1$. Материал шарика – абсолютно упругий с $\mu = 0,3$ и $E = 210$ ГПа. В результате получена степенная зависимость

$$HV = -82.61 + 98.45n^{0.349} + 1.942A^{0.798} - 1.989n^{0.349}A^{0.798}, \quad (2)$$

где HV измеряется в кгс/мм², A - в МПа.

Пределы изменения аргументов в выражении (2) $0,05 \leq n \leq 0,5$; $500 \leq A \leq 1500$ МПа. Ошибка расчета HV по (2) не превышает 3%.

На основе табличных данных, приведенных в [6], с использованием стандартных методов статистической обработки, получены зависимости предела прочности от твердости. Установлено, что зависимости имеют линейный вид. Корреляция составляет более 99%.

$$\sigma_g = a + b \cdot HV, \quad (3)$$

где HV в кгс/мм², σ_g в МПа.

Эмпирические коэффициенты в формуле (3)

№ п/п	Материал	a , МПа	b , МПа/[кгс/мм ²]
1	Углеродистая сталь	1,038	3,596
2	Хромистая сталь	0,5675	3,492
3	Хромоникелевая сталь	1,286	3,398
4	Хромомолибденовая сталь	3,928	3,287
5	Сталь, литая сталь	26,28	3,165

Предел прочности материала σ_{θ} определяется по результатам испытаний стандартных образцов на растяжение

$$\sigma_{\theta} = \frac{P_{\max}}{F_0},$$

где F_0 - исходная площадь поперечного сечения образца.

Напряжение в образце, соответствующее пределу прочности

$$\sigma_{i\theta} = \frac{P_{\max}}{F_{кр}},$$

где P_{\max} , $F_{кр}$ - сила и площадь образца, отвечающие началу образования шейки.

С учетом, что истинная деформация при растяжении $e_i = \ln \frac{F_0}{F_{кр}}$

$$F_{кр} = F_0 \exp(-e_i).$$

В работах [1, 2], анализируя устойчивость деформирования цилиндрического образца показано, что если модель материала следует аппроксимации (1), то образование шейки начинается при деформациях $e_{iкр} = n$ (моделирование процесса растяжения методом конечных элементов [7] дает те же результаты критической деформации с погрешностью менее 2%), тогда

$$\sigma_{i\theta} = \frac{P_{\max}}{F_{кр}} = \frac{P_{\max}}{F_0 \exp(-e_i)} = \sigma_{\theta} \exp(n),$$

$$\sigma_{\theta} \exp(n) = An^n,$$

откуда

$$\sigma_{\theta} = A \cdot \exp(-n) \cdot n^n. \tag{4}$$

С учетом (3)

$$A \cdot \exp(-n) \cdot n^n = a + b \cdot HB. \tag{5}$$

При известной твердости HB параметры A и n определяются путем решения системы уравнений (2), (5). Решение искали численно для наиболее часто встречающихся чисел твердости сталей, применяемых в ОМД. Результаты представлены в виде номограммы на рис. (1).

При измерении твердости иными методами, необходимо использовать шкалы перевода единиц твердости, которые зависят как от материала, так и от условий проведения испытаний (нагрузка, форма индентора и пр.) [6].

Определение кривой течения по пределу прочности и текучести

Предел текучести σ_{θ} , или условный предел текучести $\sigma_{0,2}$ - напряжение, соответствующее относительному остаточному удлинению $\varepsilon = 0,2\%$ (иногда 0,02 или 0,05%). При таких малых деформациях относительное остаточное удлинение практически равно интенсивности логарифмических деформаций:

$$e_{i0,2} \approx \varepsilon_{0,2} / 100 = 0.002,$$

где $e_i = \ln \frac{l + \Delta l}{l_0}$, $\varepsilon = \frac{\Delta l}{l_0} 100(\%)$.

Истинное напряжение, соответствующее пределу текучести можно без практической погрешности принять равным пределу текучести,

$$\sigma_{0,2} = \frac{P_{0,2}}{F_0} \approx \frac{P_{0,2}}{F_{0,2}}, \quad \sigma_i \approx \sigma_{0,2}.$$

Следовательно, согласно (1)

$$\sigma_{0,2} = A \cdot 0,002^n, \tag{6}$$

где F_0 , $F_{0,2}$ - начальная площадь поперечного сечения образца, и площадь, отвечающая $\sigma_{0,2}$; $P_{0,2}$ - сила, отвечающая $\sigma_{0,2}$.

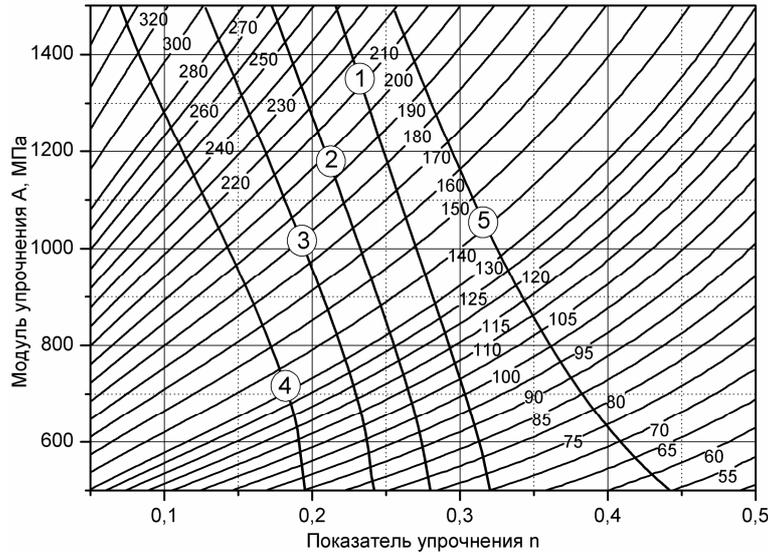


Рис. 1. Номограмма определения коэффициентов A и n по твердости HB (кгс/мм²) в зависимости от группы сталей: 1 – углеродистая; 2 – хромистая; 3 – хромоникелевая; 4 – хромомолибденовая; 5 – литая сталь

Таким образом, имеем следующую систему нелинейных уравнений (4), (6)

$$\left. \begin{aligned} \sigma_{0,2} &= A \cdot 0,002^n \\ \sigma_{\dot{a}} &= A \cdot \exp(-n) \cdot n^n \end{aligned} \right\}, \quad \text{или} \quad \left. \begin{aligned} \sigma_{\dot{a}_0} &= A \cdot \dot{a}_0^n \\ \sigma_{\dot{a}} &= A \cdot \exp(-n) \cdot n^n \end{aligned} \right\}, \quad (7)$$

где e_m - допуск на пластическую деформацию в пределе текучести.

Показатель упрочнения n из этой системы может быть найден путем численного решения следующего уравнения

$$\frac{\sigma_{0,2}}{\sigma_{\dot{a}}} - \exp(n) \cdot \left(\frac{0,002}{n}\right)^n = 0, \quad \text{или} \quad \frac{\sigma_{e_m}}{\sigma_{\epsilon}} - \exp(n) \cdot \left(\frac{e_m}{n}\right)^n = 0 \quad (8)$$

Далее подстановкой n в любое из уравнений (6) находят модуль упругости A .

На рис. 2 представлена номограмма определения показателя упрочнения n в зависимости от соотношения $\sigma_{\dot{a}}/\sigma_{e_m}$. На рисунке приведены несколько графиков, которые отвечают разным значениям относительного остаточного удлинения ϵ_r . Используя эту номограмму, следует обращать внимание на деформацию условного предела текучести. При отсутствии таких сведений используют линию $\epsilon_r = 0,002$, при наличии участка текучести материала (малоуглеродистые стали) – $\epsilon_r = 0,01 \dots 0,02$.

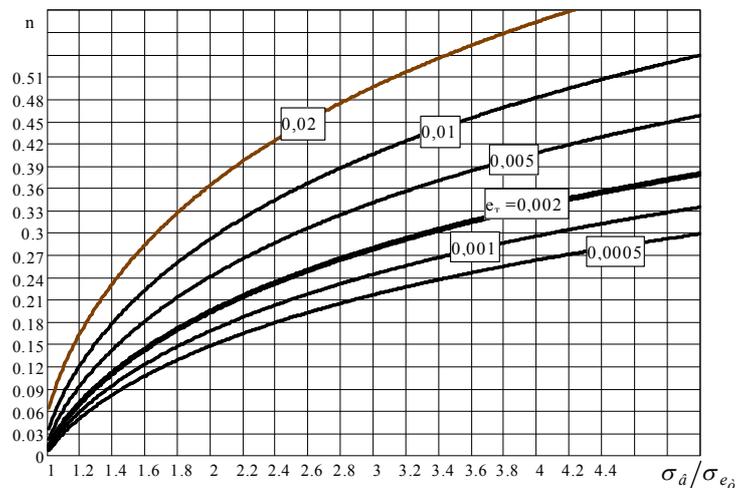


Рис. 2. Номограмма определения показателя упрочнения: e_m - допуск на пластическую деформацию в условном пределе текучести

Экспериментальная проверка рассмотренных методов для различных материалов приведена в таблице (2). Часть данных, приведенных в таблице выполнена в лаборатории пластических деформаций ВНТУ. Остальные данные взяты с различных литературных источников [1, 2, 4, 5]. Как видно из сравнения, методы дают достаточно надежные результаты расчета параметров A и n . Однако метод измерения твердости более точен, и следовательно ему следует отдавать предпочтение при прочих равных условиях.

Также проверку приведенных методик выполним путем сравнения работы пластической деформации. Оправданность использования именно такой проверки связана с рядом задач, для которых может применяться этот способ построения кривой течения – например, при экспертизах автомобильных аварий [2].

Таблица 2

Сравнение экспериментальных и расчетных данных, полученных двумя способами

№ п/п	Материал	Эксперимент					Примечание
		A, МПа	n	HB, кгс/мм ²	$\sigma_{0,2}$, МПа	$\sigma_{\dot{\epsilon}}$, МПа	
1	Сталь 3	840	0,25	135	276	406	отжиг
2	Сталь 20Х	930	0,215	157	280	480	
3	30Х3МФА	1540	0,058	375	1050	1225	Улучшенная
4	30Х3МФА	1163	0,186	206	400	708	
5	38Х2МЮА	1396	0,104	252	800	981	Улучшенная
6	38Х2МЮА	1134	0,096	260	585	711	
7	Сталь 45	1230	0,28	177	-	-	
8	Сталь 45	1100	0,155	-	365	700	отжиг
9	ШХ15	1155	0,217	190	-	-	
10	X18H9T	1305	0,288	180	-	-	
11	Сталь 20	810	0,205	138	-	-	
12	Сталь 20	730	0,205	-	255	430	отжиг
13	Сталь 30 лист	680	0,18	-	310	420	отжиг
14	ЛС59-1	890	0,43	-	140	350	
15	Титан ВТ6	1350	0,061	-	950	1100	отжиг

Таблица 2 (продолжение)

№ п/п	Материал	Расчет				Расхождение расчета и эксперимента, %					
		По твердости (способ 1)		По $\sigma_{\epsilon}, \sigma_{0,2}$ (способ 2)		Δ_A		Δ_n		Δ_W	
		A, МПа	n	A, МПа	n	Сп. 1	Сп. 2	Сп. 1	Сп. 2	Сп. 1	Сп. 2
1	Сталь 3	919	0,279	595	0,124	9,4	29,2	11,6	50,4	2,7	6,2
2	Сталь 20Х	976	0,235	755	0,16	4,9	18,8	9,3	25,6	0,1	7,5
3	30Х3МФА	1565	0,063	1553	0,063	1,6	0,8	8,6	8,6	0,3	1,0
4	30Х3МФА	1029	0,139	1128	0,167	11,5	3,0	25,3	10,2	0,3	1,8
5	38Х2МЮА	1340	0,104	1291	0,077	4,0	7,5	-	26,0	4,0	0,8
6	38Х2МЮА	1220	0,109	1149	0,109	7,6	1,3	13,5	13,5	3,1	2,9
7	Сталь 45	1262	0,286	-	-	2,6	-	2,1	-	1,3	-
8	Сталь 45	-	-	1150	0,185	-	4,5	-	19,4	-	3,6
9	ШХ15	1146	0,215	-	-	0,8	-	0,9	-	0,3	-
10	X18H9T	1020	0,182	-	-	21,8	-	36,8	-	2,8	-
11	Сталь 20	948	0,276	-	-	17,0	-	34,6	-	1,2	-
12	Сталь 20	-	-	671	0,156	-	8,1	-	23,9	-	3,6
13	Сталь 30 лист	-	-	589	0,103	-	13,4	-	42,8	-	5,7
14	ЛС59-1	-	-	628	0,24	-	29,4	-	44,2	-	4,5
15	Титан ВТ6	-	-	1386	0,061	-	2,7	-	0	-	2,7

Удельная работа до $e_i = e_{икр}$ может быть рассчитана по зависимости [4]

$$W = \int_0^{e_i} \sigma_i de_i = \int_0^{e_{икр}} A e_i^n de_i = \frac{A e_{икр}^{n+1}}{n+1} = \frac{A \cdot n^{n+1}}{n+1}$$

Погрешность расчета работы

$$\Delta W = \frac{W_p - W_\varepsilon}{W_\varepsilon} 100\% .$$

При определении работы пластической деформации методы дают приемлемые результаты с соразмерной погрешностью (см. табл. (2)).

Выводы

1. Определение параметров кривой течения по твердости является более предпочтительным способом, если исследуется черный металл при известной его принадлежности к определенной группе, определяемой химическим составом. Полученные кривые течения могут применяться для расчетов процессов ОМД. Способ применим для сталей, в.т. легированных с твердостью *HB* 55...340 кгс/мм².

2. Определение параметров кривой течения по пределам прочности и текучести дает менее надежную оценку кривой. В связи с этим полученные кривые будут оценочными. Метод предпочтителен для цветных металлов, металлов с малой или высокой твердостью, где предыдущий метод не применим. Также при помощи этого способа могут быть получены данные о кривых течения материалов при повышенной температуре. Построение кривых течения по предложенному методу имеет значение при невозможности их построения другими, более точными способами.

3. Оба метода наравне могут быть использованы при расчете энергии пластического деформирования упрочненного металла, например, при проведении экспертизы дорожно-транспортных происшествий. При деформациях, близких к критической при растяжении, ошибка определения работы в большинстве случаев не превышает 5%.

4. Если известны все три исходные характеристики - предел прочности, текучести и твердость, то показатель упрочнения предпочтительно определять по соотношению пределов прочности и текучести (см. рис. 2), а модуль упрочнения – по твердости и известному показателю упрочнения и твердости (см. рис. 3).

Список литературы

1. Хван Д. В. Технологические испытания материалов / Д. В. Хван. — Воронеж : изд-во Воронежского университета, 1992. — 152 с. — ISBN 5-7455-0671-7.
2. Огородников В. А. Энергия. Деформации. Разрушение (задачи автотехнической экспертизы) : монография / Огородников В. А., Киселев В. Б., Сивак И. О. — Винница : Универсум-Винница, 2005. — С. 176—183. — ISBN 966-641-117-2.
3. Третьяков А. В. Механические свойства сталей при пластическом деформировании. Справочник / А. В. Третьяков, Г. К. Трофимов, М. К. Гурьянов. — М.: Машиностроение, 1971. — 268 с.
4. Грушко О. В. Побудова кривої течії матеріалу за границями міцності і текучості / О.В. Грушко, В.А. Огородніков, М.І. Побережний, М.П. Єленич // Вісник ВПІ. — 2009. — №6 (87). — С. 90-93. - ISSN 1997-9266.
5. Грушко А. В. О связи исходной твердости и кривой течения материала / А.В. Грушко // Вісник Хмельницького національного університету. Технічні науки. — 2009. — №3(132). — С. 35-40.
6. Биргер И. А. Расчет на прочность деталей машин : Справочник / И. А. Биргер, Б. Ф. Шорр, Г. Б. Иосилевич // [4-е изд., перераб. и доп.] — М. : Машиностроение, 1993 — 640 с. - ISBN 5-217-01304-09266.
7. Грушко А.В. Особенности напряженно-деформированное состояния в шейке цилиндрического образца / А.В. Грушко, В.А. Огородников, И.Ю. Кирица, Н.П. Еленич // Обработка материалов давлением. Сборник научных трудов. — 2009. — №1(20) — С. 25-29.