

## РАЗДЕЛ II ПРОЦЕССЫ ОБРАБОТКИ ДАВЛЕНИЕМ В МАШИНОСТРОЕНИИ

УДК 621.919

Грушко А. В.

### ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ КРИВОЙ ТЕЧЕНИЯ МАТЕРИАЛА ПО ЕГО ТВЕРДОСТИ

В расчетах процессов обработки металлов давлением (ОМД) применяются кривые течения материала, представляющие зависимости интенсивности нормальных напряжений и интенсивности логарифмических деформаций  $\sigma_i = f(e_i)$ . 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;

$\sigma_i$ ,  $e_i$  – интенсивность напряжений и деформаций (истинное напряжение и деформация).

В литературе известно достаточно большое количество методов построения кривых течения, основывающихся на изготовлении и последующем испытании разного типа образцов [1–6]. Все эти методы трудоемки, требуют специального оборудования для проведения испытаний и определенную квалификацию исследователя. В ряде случаев (например, при экспертизах дорожно-транспортных происшествий) не представляется возможным получить необходимые образцы для проведения испытаний без операций, разрушающих конструкцию [2]. Следовательно, достаточно актуальным является создание метода, сочетающего в себе простоту использования, неразрушающий контроль и обладающий приемлемой точностью для инженерных расчетов процессов ОМД.

В технологических процессах обработки металлов давлением, резанием, достаточно часто используется параметр, отвечающий за механические свойства материала – его твердость [4]. Основным методом измерения твердости металлов является их испытание по Бринеллю путем вдавливания стального шарика диаметром 10 мм с усилием 3000 кгс на протяжении 10...15 с (ГОСТ 9012-59 (ИСО 6506-81, ИСО 410-82) в редакции 1990 г.). Твердость является комплексным показателем, который для данных условий испытаний зависит от механических характеристик материала. Твердость черных металлов зависит преимущественно от кривой течения материала, поскольку характеристики упругости различных марок стали практически постоянны.

Связь твердости с кривой течением материала получена в [7] 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:

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

где  $HB$  измеряется в кгс/мм<sup>2</sup>;  $A$  – в МПа.

Пределы изменения аргументов в выражении (2)  $0,05 \leq n \leq 0,5$ ;  $500 \leq A \leq 1500$  МПа.

Ошибка расчета  $HB$  по (2) не превышает 3 %.

Таким образом, согласно [7], одному значению твердости может соответствовать достаточно широкий разброс аргументов. В связи с этим возникает неопределенность, приводящая к необходимости задаваться приближенно, например, показателем упрочнения. Это вносит существенную погрешность в искомую кривую течения, что в ряде случаев недопустимо.

Целью работы является разработка и проверка метода определения эмпирических коэффициентов  $A$  и  $n$  кривой течения материала (сталей) в зависимости от его стандартной твердости  $HB$  в предположении начальной изотропности материала.

Определенные группы материалов (в основном стали) имеют особенности корреляционных связей их механических свойств, которые могут быть предложены в качестве дополнительных условий при решении поставленной задачи. В частности, нами будет использована зависимость между пределом прочности материала и его твердостью по Бринеллю [7].

На основе табличных данных, приведенных в [8], с использованием стандартных методов статистической обработки, получены зависимости предела прочности от твердости. Установлено, что зависимости имеют линейный вид. Корреляция составляет более 99 %.

Углеродистая сталь [8]:

$$\sigma_u = 1,068 + 3,596HB. \quad (3)$$

Хромистая сталь [8]:

$$\sigma_u = 0,5675 + 3,492HB. \quad (4)$$

Хромоникелевая сталь [8]:

$$\sigma_u = 1,286 + 3,398HB. \quad (5)$$

Хромомолибденовая сталь [8]:

$$\sigma_u = 3,928 + 3,287HB. \quad (6)$$

Сталь, литая сталь [9]:

$$\sigma_u = 26,28 + 3,165HB, \quad (7)$$

где  $HB$  в кгс/мм<sup>2</sup>;  $\sigma_u$  – в МПа.

Предел прочности материала  $\sigma_u$  определяется по результатам испытаний стандартных образцов на растяжение:

$$\sigma_u = \frac{P_{\max}}{F_0},$$

где  $F_0$  – исходная площадь поперечного сечения образца.

Напряжение в образце, соответствующее пределу прочности:

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

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

С учетом, что истинная деформация при растяжении:

$$e_i = \ln \frac{F_0}{F_{кр}}; \quad F_{кр} = F_0 \exp(-e_i).$$

В работах [1–2], анализируя устойчивость деформирования цилиндрического образца, показано, что если модель материала следует аппроксимации (1), то образование шейки начинается при деформациях  $e_{икр} = n$  (моделирование процесса растяжения методом конечных элементов [10] дает те же результаты критической деформации с погрешностью менее 2%), тогда:

$$\sigma_{iu} = \frac{P_{\max}}{F_{кр}} = \frac{P_{\max}}{F_0 \exp(-e_i)} = \sigma_u \exp(n);$$

$$\sigma_{iu} = A e_{икр}^n = A n^n;$$

$$\sigma_u \exp(n) = A n^n.$$

Откуда:

$$\sigma_u = A \cdot \exp(-n) \cdot n^n. \quad (8)$$

Таким образом, для уравнения (3) (углеродистая сталь) можно предложить зависимость:

$$1,068 + 3,596 HB = A \cdot \exp(-n) \cdot n^n. \quad (9)$$

При известной твердости  $HB$  параметры  $A$  и  $n$  определяются путем решения системы уравнений (2), (9):

$$\left. \begin{aligned} 1,068 + 3,596 HB &= A \cdot \exp(-n) \cdot n^n \\ HB &= -82.61 + 98.45 n^{0.349} + 1.942 A^{0.798} - 1.989 n^{0.349} A^{0.798} \end{aligned} \right\}. \quad (10)$$

Аналогичные системы будут для (4) – (7).

Отклонения значений  $HB$  по (2) составляет не более 3%. Для задач технологической механики такой точности вполне достаточно. Зависимость (9), на наш взгляд, менее точна, что связано с приближенностью оценки критических деформаций  $e_{икр} = n$  и приближенностью эмпирической связи предела прочности с твердостью согласно уравнениям (4)–(7). Проведенные исследования показывают, что погрешность такой оценки может быть до 10%.

Решение системы уравнений (10) 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 материалов, так и от условий проведения испытаний (нагрузка, форма индентора и пр.). В частности, на сегодняшний день нашел широкое распространение динамический метод измерения твердости по Либу ( $HL$ ), реализованный в переносных компактных твердомерах [2, 9]. Используя данные [9], нашли зависимость между числами твердости по Либу  $HL$  и стандартной твердости по Бринеллю  $HB$  в виде степенной функции:

$$HB = a + b \cdot HL^c, \quad (11)$$

где  $a, b, c$  – коэффициенты, зависящие от свойств материала.

Корреляция по (11) составила более 99,97 %, что указывает на удачный выбор функции. Для различных материалов значения аппроксимирующих коэффициентов приведены в табл. 1.

Таблица 1

Коэффициенты аппроксимации для некоторых материалов по (11)

Коэффициенты	Материал			
	Сталь, литая сталь	Инструментальная сталь	Нержавеющая сталь	Алюминий
$a$ , кгс/мм <sup>2</sup>	11,98	13,27	22,06	-4,32
$b$ , кгс/мм <sup>2</sup>	$1,73 \cdot 10^{-4}$	$1,10 \cdot 10^{-4}$	$1,21 \cdot 10^{-4}$	$6,80 \cdot 10^{-4}$
$c$	2,252	2,33	2,307	1,563
Пределы твердости НВ, кгс/мм <sup>2</sup>	100–300	100–300	100–300	50–160

Экспериментальная проверка предложенного метода для различных материалов приведена в табл. 2. Часть данных, приведенных в табл. 2, выполнена в лаборатории пластических деформаций ВНТУ. Остальные данные взяты с различных литературных источников [1, 4, 5, 7]. Как видно из сравнения, метод дает достаточно надежные результаты расчета параметров  $A$  и  $n$ .

Таблица 2

Сравнение экспериментальных и расчетных данных

№ п/п	Материал	Эксперимент			Расчет по (2)		$\Delta A$ , %	$\Delta n$ , %
		$A$ , МПа	$n$	$HB$ , кгс/мм <sup>2</sup>	$A$ , МПа	$n$		
1	Сталь 45	1230	0,28	177	1262	0,286	2,6	2,1
2	ШХ15	1155	0,217	190	1146	0,215	0,77	0,8
3	X18H9T	1305	0,288	180	1020	0,182	21,9	33,3
4	Сталь 20	810	0,205	138	948	0,276	17,1	34,7
5	Сталь 3	840	0,25	135	919	0,279	9,4	11,8
6	Сталь 20X	930	0,215	157	976	0,235	5	9,5
7	30X3МФА	1540	0,058	375	1565	0,063	1,7	7,8
8	30X3МФА	1163	0,186	206	1029	0,139	11,5	25,4
9	38X2МЮА	1396	0,104	252	1340	0,104	4,0	12,4
10	38X2МЮА	1134	0,096	260	1220	0,109	7,5	13,7

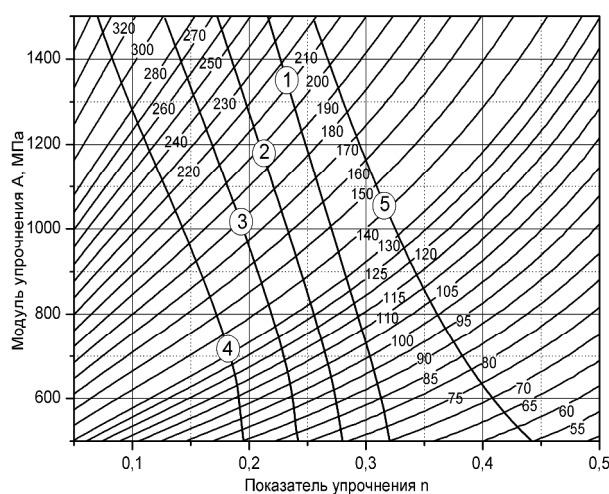


Рис. 1. Номограмма определения коэффициентов  $A$  и  $n$  по твердости  $HB$  (кгс/мм<sup>2</sup>) в зависимости от группы сталей:

1 – углеродистая [8]; 2 – хромистая [8]; 3 – хромоникелевая [8]; 4 – хромомолибденовая [8]; 5 – литая сталь [9]

Таким образом, кривая течения материала может быть построена по его твердости  $HV$ . Такой метод может оказаться очень удобным при специальной экспертизе автотехнических происшествий [2]. Для этого на недеформированной части детали произвести испытание твердости. Далее с учетом группы материала в соответствии с номограммой (см. рис. 1) определить модуль и показатель упрочнения.

Отметим также, что при моделировании измерения твердости (2) использовалась степенная аппроксимация кривой течения (1) и если материал не следует такому закону упрочнения, то следует ожидать больших отклонений рассчитанных значений от действительных.

## ВЫВОДЫ

Характерной особенностью свойств ряда сталей является существование зависимости между показателем и модулем упрочнения, являющейся следствием связи предела прочности и твердости материала. Эти зависимости, в общем, являются нелинейными, но с небольшой кривизной графиков и монотонно убывающими. Как следствие, увеличение твердости в пределах данной группы материала связано с одновременным изменением двух параметров – уменьшением показателя  $n$  и увеличением модуля упрочнения  $A$ .

В пределах определенной группы сталей, определяемой химическим составом, твердость по Бринеллю сильно коррелирует с кривой течения материала, задаваемой в виде степенной функции. Для удобства использования метода приведена номограмма (см. рис. 1) определения коэффициентов  $A$  и  $n$  (1) по твердости  $HV$ . При измерении твердости иными методами, необходимо произвести ее пересчет на стандартную твердость. Например, твердость по Либу – с использованием аппроксимации (11) или опираясь на данные [9]. Высокой точности пересчета в данном случае не требуется с учетом приближенности предложенного метода.

Метод имеет удовлетворительную для большинства инженерных расчетов точность, которая превосходит точность иных приближенных методов.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Хван Д. В. Технологические испытания материалов / Д. В. Хван. — Воронеж : Воронежский университет, 1992. — 152 с.
2. Огородников В. А. Энергия. Деформации. Разрушение (задачи автотехнической экспертизы) : монография / В. А. Огородников, В. Б. Киселев, И. О. Сивак. — Винница : Универсум–Винница, 2005. — С. 176–183.
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. Дель Г. Д. Определение напряжений в пластической области по распределению твердости / Г. Д. Дель. — М. : Машиностроение, 1971. — 200 с.
5. Побудова кривої течії матеріалу за границями міцності і текучості / О. В. Грушко, В. А. Огородников, М. І. Побережний, М. П. Єленич // Вісник ВПІ. — 2009. — № 6 (87). — С. 90–93.
6. Грушко А. В. Построение кривых течения материалов с учетом шейкообразования / А. В. Грушко, В. А. Огородников, В. И. Музычук // Кузнечно-штамповочное производство. Обработка металлов давлением. — 2007. — № 8. — С. 16–20.
7. 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.
8. Бюргер И. А. Расчет на прочность деталей машин : справочник / И. А. Бюргер, Б. Ф. Шорр, Г. Б. Юселевич. — [4-е изд., перераб. и доп.]. — М. : Машиностроение, 1993 — 640 с.
9. Режим доступа : [http://www.corvib.com/equotip/hardness\\_conversion.htm](http://www.corvib.com/equotip/hardness_conversion.htm).
10. Особенности напряженно-деформированного 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.

Грушко А. В. — канд. техн. наук, доц. ВНТУ.

ВНТУ – Винницкий национальный технический университет, г. Винница.

E-mail: [grushko@svitonline.com](mailto:grushko@svitonline.com)