

В.Л. Силові режими та якість виробів при холодному видавлюванні порожнистих виробів із сталі в умовах прикладання розтягуючого зусилля до заготовки. // В.Л. Калюжний та ін.; Наукові нотатки. Міжвузівський збірник. Луцький національний технічний університет. Вип. №25. Частина 2. – 2009. – С. 103-107.

**УДК 621.919**

**ГРУШКО А.В.**, канд. техн. наук, доц., ВНТУ, Вінниця

## **ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ СКОРОСТНОГО УПРОЧНЕНИЯ МАТЕРИАЛА ПО ЕГО ТВЕРДОСТИ**

Предложен метод определения параметров, учитывающих скоростное упрочнение материала в холодном состоянии. Метод основан на измерении стандартной твердости по Бринеллю (НВ) и Либу (НЛ). Проведено моделирование при помощи метода конечных элементов. Получены регрессионные зависимости показателя скоростного упрочнения от чисел твердости НВ, НЛ для некоторых групп сталей.

Запропоновано метод визначення параметрів, що враховують швидкісне зміцнення матеріалу в холодному стані. Метод ґрунтується на вимірюванні стандартної твердості за Брінелем (НВ) і Лібом (НЛ). Проведено моделювання за допомогою методу кінцевих елементів. Отримано регресійні залежності показника швидкісного зміцнення від чисел твердості НВ, НЛ для деяких груп сталей.

The method of determination of parameters, taking into account the speed work-hardening material in the cold state is offered. A method is based on measuring of standard hardness by Brinell (HB) and Leeb (HL). A design through the finite-element method is conducted. Regressive dependences of index of the speed work-hardening are got on the hardness of HB, HL for some groups of steels.

Учет влияния скорости деформаций металлов необходим для моделирования процессов обработки металлов давлением, в основе которых лежит ударное воздействие на обрабатываемую заготовку. Скоростные эффекты учитываются при моделировании столкновения автомобилей, самолетов, механизмов, аварий строительных конструкций, проведении экспертиз, связанных с определением энергии деформации при столкновении автомобилей и пр. [1, 2]. Отметим, что справочные данные влияния скорости деформации на упрочнение в холодном состоянии для большинства конструкционных материалов отсутствуют. Определение параметров, определяющих скоростное упрочнение материала, связано с проведением специальных лабораторных динамических испытаний. Таким образом, актуальным является разработка метода определения параметров скоростного упрочнения материала, позволяющего применять стандартные методы испытаний. Предлагаемый ниже метод основан на измерении твердости материала двумя методами – стандартным статическим испытанием по Бринеллю (*НВ*) и динамическим по Либу (*НЛ*). Твердость *НЛ* измеряется при помощи портативного переносного твердомера, использование которого приобретает большую популярность, благодаря удобству использования. В статических измерениях скоростные эффекты ничтожно малы,

динамические измерения их учитывают. Учет этой разности позволяет оценить параметры динамического поведения материала. В дальнейшем рассматривается изотропное упрочнение начально-изотропного материала.

Важным вопросом при изучении поведения материала в условиях динамического нагружения, является выбор модели его скоростного упрочнения. На сегодняшний день распространение получили следующие модели [5]:

Джонсона-Кука

$$\sigma_i = (\sigma_y + B_1 e_i^{k_1}) (1 + c_1 \ln \dot{\epsilon}_i), \quad (1)$$

Купера-Саймонда

$$\sigma_i = B_2 (e_y + e_i)^{k_2} \left( 1 + \left[ \frac{\dot{\epsilon}_i}{c_2} \right]^{\frac{1}{p}} \right), \quad (2)$$

где  $B$  и  $k$  – эмпирические коэффициенты – модуль и показатель упрочнения материала;  $\sigma_i$ ,  $e_i$  – интенсивность напряжений и деформаций (истинное напряжение и деформация);  $\dot{\epsilon}_i$  – интенсивность скоростей деформаций;  $c$  и  $P$  – коэффициенты, учитывающие влияние скорости деформаций на напряжение текучести.

Отмечено [5], что модель Купера-Саймонда является более предпочтительной при моделировании процессов холодного пластического деформирования.

При скоростях деформаций больше  $10 \text{ с}^{-1}$  модель Купера-Саймонда, с учетом встречающихся на практике констант параметров упрочнения материала, можно представить в виде

$$\sigma_i = A \dot{\epsilon}_i^m (e_0 + e_i)^n.$$

При пластических деформациях  $e_i$ , превышающих 0,05, деформацией предела текучести можно пренебречь. В дальнейшем, воспользуемся распространенным способом задания предела текучести в программах МКЭ, как пересечение прямолинейного упругого участка, задаваемого модулем Юнга со степенной функцией [5]

$$\sigma_y = A \left( \frac{E}{A} \right)^{\frac{n}{n-1}}.$$

Деформация, соответствующая пределу текучести

$$e_y = \left( \frac{E}{A} \right)^{\frac{1}{n-1}}.$$

Таким образом, окончательной моделью упрочнения материала будет функция

$$\sigma_i = A \dot{\epsilon}_i^m \left[ \left( \frac{E}{A} \right)^{\frac{1}{n-1}} + e_i \right]^n. \quad (3)$$

Целью данной работы является обоснование и разработка метода определения параметра  $m$  скоростного упрочнения путем измерения его твердости по Бринеллю  $HB$  и Либу  $HL$ .

Решение поставленной задачи будем искать на основе изучения двух процессов пластического деформирования металла – внедрение сферического индентора в упруго-пластическое полупространство в статической постановке задачи и в динамической.

Связь твердости с кривой течения материала получена в [3] с использованием МКЭ 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

$$HB = -82.61 + 98.45n^{0.349} + 1.942A^{0.798} - 1.989n^{0.349}A^{0.798}, \quad (4)$$

где  $HB$  измеряется в кгс/мм<sup>2</sup>,  $A$  - в МПа. Пределы изменения аргументов в выражении (4)  $0,05 \leq n \leq 0,5$ ;  $500 \leq A \leq 1500$  МПа.

Коэффициенты аппроксимации  $A$  и  $n$  предлагается искать путем решения системы уравнений

$$\left. \begin{aligned} a + b \cdot HB &= A \cdot \exp(-n) \cdot n^n \\ HB &= -82.61 + 98.45n^{0.349} + 1.942A^{0.798} - 1.989n^{0.349}A^{0.798} \end{aligned} \right\}$$

где  $a, b$  - эмпирические коэффициенты связи предела прочности и твердости, зависящие от группы стали [4].

Ошибка расчета  $A$  и  $n$  по  $HB$  не превышает 7%.

При измерении твердости по Либу измеряют скорость отскока  $v_{отск}$  ударника со сферическим наконечником диаметром 3 мм, массой 5,5 г, с начальной скоростью  $v_0 = 2$  м/с (энергия удара 11 Н\*мм). Твердость по Либу определяется согласно зависимости

$$HL = 1000 \frac{v_{отск}}{v_0}. \quad (5)$$

Задача исследования напряженно-деформированного состояния металла в процессе измерения его твердости по Либу является динамической, упруго-пластической, контактной, нелинейной, требующей учета больших перемещений и деформаций. В настоящее время наиболее перспективным методом решения таких задач является МКЭ. Лидером среди пакетов, позволяющих решать существенно нелинейные динамические задачи МКЭ с реалистическими математическими моделями материалов есть LS-DYNA.

Свойства материала задавали в виде кривой течения с учетом скоростного упрочнения, согласно зависимости (3).

Задавались  $HB$  в пределах 100-300 кгс/мм<sup>2</sup> с интервалом 25. Рассчитывали для каждой группы материала коэффициенты  $A$  и  $n$ . Задавались показателем скоростного упрочнения в пределах 0...0,2 с интервалом 0,04. Характеристики

упругости материала принимали такими же, как и при моделировании твердости по Бринеллю: коэффициент Пуассона  $\mu = 0,3$ , модуль Юнга  $E = 210$  ГПа, материал шарика – абсолютно упругий с  $\mu = 0,3$  и  $E = 210$  ГПа. Коэффициент трения -  $f = 0,1$ .

Таким образом, для каждой группы сталей проводили приблизительно по 40 расчетов. Отметим, что скорость деформации в очаге формоизменения достигала значений 500-1500 с<sup>-1</sup>.

В результате получены данные моделирования измерения твердости по Либу  $HL = f(HB, m)$  для 5-ти групп сталей – углеродистой, хромистой, хромоникелевой, хромомолибденовой, литой стали [6, 7].

Оказалось, что зависимость между искомыми величинами достаточно точно описывает полином 2-й степени в виде

$$m = m_0 + a \cdot HB + b \cdot HL + c \cdot HB^2 + d \cdot HL^2 + f \cdot HB \cdot HL, \quad (6)$$

где  $m_0, a, b, c, d, f$  - коэффициенты аппроксимации, полученных расчетным путем данных, приведены в таблице (1). Число твердости  $HB$  измеряется в кгс/мм<sup>2</sup>, (пределы 100-300 кгс/мм<sup>2</sup>),  $HL$  - безразмерная величина (300-800).

Погрешность расчета  $m$  по (6) не превышает 8%, что достаточно для большинства инженерных расчетов.

Для удобства использования и наглядности полученных результатов на рисунке приведены номограммы, построенные по уравнению (6). На графиках показаны области практического использования зависимости (6) для соответствующих сталей.

В таблице (2) приведены результаты расчета и эксперимента параметра скоростного упрочнения. Как видно, из сравнения, предложенный метод имеет удовлетворительную точность с погрешностью в пределах 10%.

Таблица 1. Коэффициенты аппроксимации в выражении (6)

Коэффициенты	Группа стали				
	хромо-молибденовая	углеродистая	хромистая	хромо-никелевая	литая сталь
$m_0$	-0,423	-0,411	-0,404	-0,429	-0,323
$a$	-0,00637	-0,01029	-0,00839	-0,00796	-0,00956
$b$	0,00356	0,00518	0,0044	0,00424	0,00478
$c$	8,21E-7	-5,39E-6	-2,41E-6	-1,74E-6	-3,42E-6
$d$	-3,17E-6	-6,81E-6	-4,97E-6	-4,57E-6	-5,98E-6
$f$	6,77E-6	1,85E-5	1,25E-5	1,13E-5	1,55E-5

Таблица 2. Результаты эксперимента и расчета

№ п/п	Материал	Эксперимент				Расчет	Эксперимент нт m
		A, МПа	<i>n</i>	HB, кгс/мм <sup>2</sup>	HL	m	
1	Сталь 45	1230	0,28	177	425	0,042	0,035
2	ШХ15	1155	0,217	190	506	0,071	0,067
3	X18H9T	1305	0,288	180	512	0,093	0,098
4	Сталь 20	810	0,205	138	400	0,062	0,056
6	Сталь 20X	930	0,215	157	453	0,080	0,087

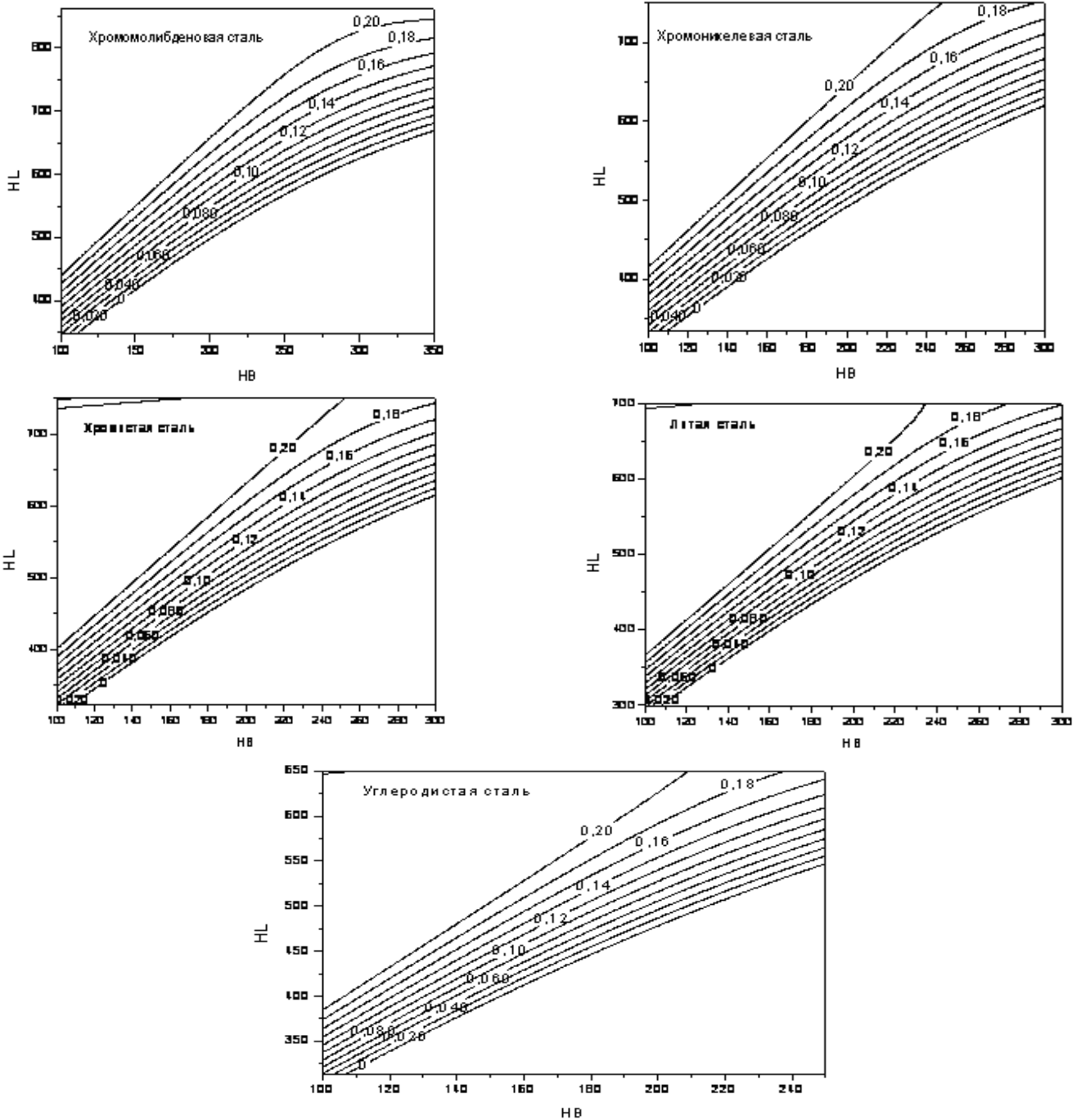


Рис. Номограммы определения показателя скоростного упрочнения

## Выводы

1. Между твердостью по Бринеллю и Либу однозначной связи не наблюдается, в связи с разной скоростной упрочняемостью материалов, в том числе в пределах одной группы по химическому составу.
2. Для определения показателя скоростного упрочнения, согласно модели (6), необходимо измерить статическую твердость по Бринеллю и динамическую по Либу. В соответствие с номограммами или выражения (6), с учетом группы материала, рассчитать искомую величину показателя скоростного упрочнения.
3. Метод может быть предложен в качестве экспресс-оценки чувствительности материала к скоростному упрочению при специальной экспертизе дорожно-транспортных происшествий и расчетов процессов обработки металлов давлением.

**Список литературы:** 1. *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. 2. *Огородников В.А.* Учет скоростного упрочнения материалов при оценке энергии пластического деформирования элементов конструкции автомобиля / *Огородников В.А., Грушко А.В., Захаров В.В.* // Известия ТулГУ. Серия. Механика деформируемого твердого тела и обработка металлов давлением. – Тула: ТулГУ. Вып. 3. – 2005. – С. 26-33. 3. *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. 4. *Грушко О.В.* Определение кривой течения материала по стандартным механическим характеристикам / *Грушко О.В.* // Вісник Національного технічного університету України "КПІ". Серія: "Машиностроение" – 2010 - №60. – С. 133-137. 5. *John O. Hallquist.* LS-DYNA theoretical manual / *John O. Hallquist.* Livermore Software Technology Corporation. – 1998. 6. *Бургер И. А.* Расчет на прочность деталей машин : Справочник / *И. А. Бургер, Б. Ф. Шорп* // [4-е изд., перераб. и доп.] – М. : Машиностроение, 1993 – 640 с. - ISBN 5–217–01304–09266. 7. Режим доступа: [http://www.corvib.com/quotip/hardness\\_conversion.htm](http://www.corvib.com/quotip/hardness_conversion.htm).

## УДК 621. 7

**О. В. КАЛЮЖНИЙ**, канд. тех. наук, ст. викл.; НТУУ "КПІ", Київ

**І.В. ВИХОВАНЕЦЬ**, магістр; НТУУ „КПІ”, Київ

**М.С. НІКОЛЕНКО**, студ.; НТУУ "КПІ", Київ

**О.В. МЕЛЬНИК**, студ., НТУУ "КПІ", Київ

## РОЗРАХУНКОВИЙ АНАЛІЗ РЕСУРСОЗБЕРІГАЮЧОЇ ТЕХНОЛОГІЇ ІНТЕНСИВНОГО ЗМІЦНЕННЯ МЕТАЛУ НАВКОЛО ОТВОРІВ У ПРОФІЛЯХ І ЛИСТОВИХ ЗАГОТОВКАХ

Методом скінченних елементів розглянуто аналіз операцій технології інтенсивного зміцнення металу навколо отворів в профілях або листових заготовках за допомогою холодної пластичної деформації. Технологія включає наступні операції – формоутворення отворів холодним видавлюванням двома пуансонами з утворенням виступів на поверхнях заготовки, пробивання перемички та осаджування виступів пуансоном з оправкою. Розрахунком визначено силові режими, розподіл питомих зусиль на деформуючому інструменті. Встановлено розміри осередку деформації в об'ємі заготовки та величину зміцнення металу.