



Музичук В. І.

Нахайчук О. В.

Вінницький
державний
аграрний
університет

УДК 621.775

**ОСОБЛИВОСТІ ПОБУДОВИ
КРИВИХ ТЕЧІЇ З УРАХУВАННЯМ
ЕФЕКТУ БАУШИНГЕРА***Работа посвящена изучению эффекта Баушингера и результатам полученных экспериментальных данных.**Work is devoted the study of effect of Baushingera and results experimental findings.*

Фізична сутність ефекту Баушингера полягає в зниженні опору малим пластичним деформаціям (межі пружності і пластичності) після попередньої пластичної деформації протилежного знака. Це явище вперше було виявлено Баушингером у 1881 році при досліджах із залізом.

В даний час вивченню природи зазначеного ефекту присвячено безліч робіт [1 - 9]. Експериментальні дані цих робіт показують, що зміцнення матеріалу при розтягу знижує по абсолютній величині границю текучості при стиску, і навпаки. Це явище називають ефектом Баушингера. Взагалі при пластичному деформуванні метали здобувають властивості анізотропії, тобто механічні характеристики спочатку ізотропних матеріалів, наприклад, границя текучості, починає залежати від напрямку деформування. Ефект Баушингера є наслідком придбанної анізотропії металів.

З ряду робіт присвячених вивченню ефекту Баушингера, слід зазначити дослідження Г.Б. Талипова, як найбільш великі і повні [2].

Г.Б. Талиповим пропонується оцінювати ефект Баушингера, наприклад, при одноосному розтягу – стиску по наступному співвідношенню:

$$\beta = \sigma_d / \sigma(e), \quad (1)$$

де σ_d – умовна границя текучості при стиску зразка після його розтягу до деформації $\sigma(e)$; d – величина допуску на пластичну деформацію в %.

На рис. 1 показана розрахункова схема до визначення β . Тут σ_r – вихідна границя текучості, $\sigma_p(e)$ – діаграма розтягу.

На рис. 2 показана залежність параметра β від e . Результати експериментальних досліджень показують, що параметр β

інтенсивно зменшується при накопиченій деформації $e \leq 0,05$. При деформації $e > 0,05$ цей параметр для більшості металів залишається постійним і рівний деякому значенню β_m . У зв'язку з цим параметр можна розглядати як механічну характеристику металів, що характеризує їхню схильність до прояву деформаційної анізотропії.

У роботі [4] відзначено, що величина β_m залежить від значення допуску на пластичну деформацію при визначенні умовної границі текучості σ_d . Однак незалежно від вибору значення d характер зміни параметра β при цьому залишається тим самим. Із зменшенням значення d параметр β зменшується. У теоріях пластичності звичайно приймають $d = 0,2\%$, що відповідає стандартній характеристиці матеріалу $\sigma_{0,2}$ названого умовною границею текучості. Ю.І. Янг і його учні експериментально довели правильність вибору зазначеного допуску, тому що тільки при технічному допуску 0,002 приблизно виконуються критерії пластичності Мізеса і Сен-Венана і вони виявляються неприйнятними при малих значеннях d . У зв'язку з відзначеною обставиною в роботі параметр β визначається по величині границі текучості $\sigma_{0,2}$ при навантаженні в напрямку протилежному попередньому пластичному деформуванню.

Експериментальні дані [2] свідчать про залежність β_m від виду напруженого стану, реалізованого при реверсивному пластичному деформуванні. Параметр β_m , отриманий дослідженням зразка при одноосному розтягу-стиску, відрізняється від параметра β_m , визначеного дослідженням тонкостінних трубок на реверсивне кручення (просте зрушення). Установлено також, що β_m є парною функцією параметра Надаї-Лодє- μ_σ , що характеризує вид напруженого стану.

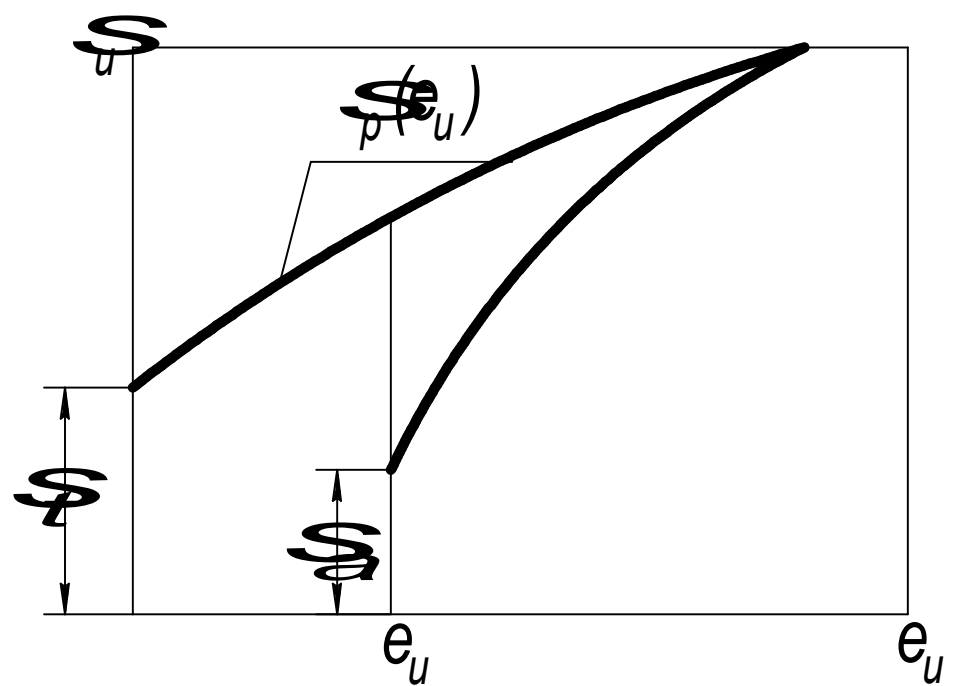


Рис. 1. Схема для визначення параметра β

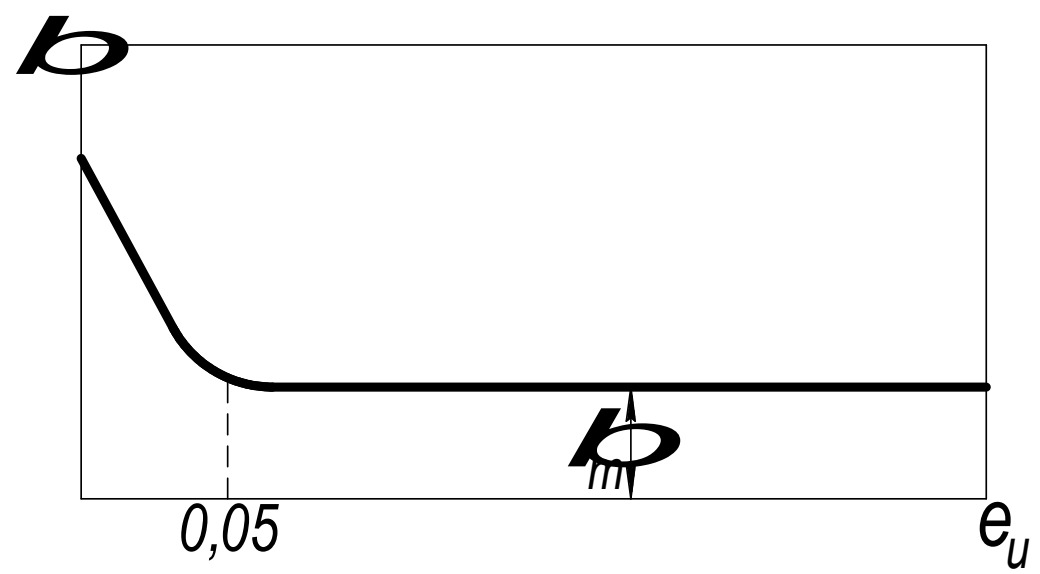
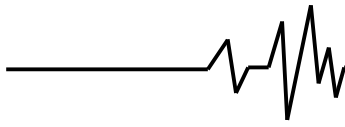


Рис. 2. Залежність параметра β від e_u

Для оцінки параметра β , як правило, проводять дослідження циліндричних зразків на одноосний розтяг з наступним стиском. При цьому партія стандартних зразків у кількості близько 30 шт. розбивається на 10 підпартій (по 3 шт.) з метою розтягу їх до накопичених деформацій $e_u = 0,005; 0,010; 0,015; 0,020; 0,030; 0,050; 0,07; 0,100; 0,150; 0,200$. Далі з цих пластично деформованих зразків вирізують

короткі циліндричні зразки відповідно до держстандарту 25.503-80 і осаджують їх в осьовому напрямку до залишкової деформації $d=0,2\%$, фіксуючи при цьому по силувимірювачу дослідницької машини відповідного їй навантаження $P_{0,2}$.

Абсолютно точно зжати зразок до деформації $e_u=0,002$ практично не вдається, тому попередньо будують діаграму стиску при



деформації $e_u \leq 0,005$ і по ній відповідно до стандартної методики визначають умовну границю текучості $\sigma_{0,2}$. Для виміру дуже малих переміщень застосовують, наприклад, механічні тензометри конструкції Гугенберґера.

$$\beta = \begin{cases} 1 + (1 - \beta_m) \cdot [(e_u / 0,05) - 2] \cdot e_u / 0,05 & \text{при } e_u = 0,05 \\ \rho_m & \text{при } e_u > 0,05 \end{cases} \quad (2)$$

При пластичному деформуванні металів передбачається, що їх зміцнення залежить лише від повної зробленої пластичної роботи. Наслідком цієї гіпотези є існування в кожного матеріалу єдиної для усіх видів напруженого стану і історії навантаження кривої течії або діаграми деформування, що являє собою залежність між еквівалентним напруженням (впливаючи з теорії Мізеса, інтенсивністю напружень - σ_u і еквівалентною деформацією інтенсивності деформації - e_u):

$$\sigma_u = f(e_u). \quad (3)$$

Під еквівалентним напруженням розуміють деяке узагальнене напруження, однакове для різних процесів пластичного деформування, при якому досягається та сама

$$e_k = -\frac{1}{2} \ln(1 - 2\mathcal{E}_k) = \frac{1}{2} \ln(1 + 2l_k) = \ln(1 + \delta_k), \quad (4)$$

тут \mathcal{E}_k , l_k - головні компоненти тензора деформації відповідно Ейлера і Лагранжа; δ_k - відносна деформація нескінченно малих відрізків, сполучених з головними напрямками зазначених тензорів деформації; $K = 1, 2, 3$. З цієї рівності випливає, що:

$$e_k = \ln \frac{dS_k}{dS_0}, \quad (5)$$

де dS_0 , dS_k - відповідно довжина лінійного елемента, орієнтованого в головному напрямку до і після деформації.

Побудова кривих течії матеріалів.

Криву течії звичайно будують за результатами стандартних статичних досліджень на одноосний розтяг, стиск і кручення циліндричних зразків.

Для ізотропного матеріалу з ізотропним зміцненням еквівалентне напруження приймають рівним інтенсивності напружень - σ_u , а еквівалентну деформацію - інтенсивністю логарифмічної деформації - e_u .

Дослідженням на розтяг одержують дані для побудови кривої течії лише при обмежених деформаціях, рівних критичному значенні $e_{кр}$, що відповідає початку втрати стійкості

При розрахунках технологічних процесів можна використовувати залежність $\beta = \beta(e_u)$, апроксимовану у вигляді [20]:

ступінь зміцнення. Ступінь деформації двох різних процесів обробки металів тиском називають еквівалентними, якщо вони приведуть до одного і того ж деформаційного зміцнення. При цьому еквівалентні деформації повинні виражатися сумірними величинами, що мають однакові граничні значення, незалежно від того, чи є вони деформаціями того самого знака чи різних знаків. Ця властивість e_u дозволяє деформування здійснювати ступінчато із зміною історії навантаження, наприклад, стиск, після попереднього розтягу.

Як міру еквівалентної деформації, що задовольняє зазначеним її властивостям, у теорії обробки металів тиском часто використовуються запропоновані П. Людвігом головні логарифмічні деформації:

пластичного деформування (утворенню шийки). Для побудови кривої $\sigma_u = \sigma_u(e_u)$ при деформаціях $e_u > e_{u(крп)}$ у разі потреби використовують

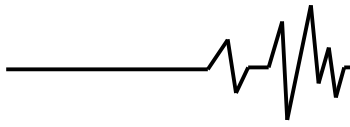
різні наближені розв'язання задач про напружений стан точок, що лежать у найменшому поперечному перерізі шийки зразка з ізотропного матеріалу. Як показала експериментальна перевірка, проведена методом виміру твердості, розглянуте рішення задовільно погоджується з даними досліджень.

При побудові кривої течії матеріалу за результатами досліджень на кручення циліндричних зразків суцільного перетину обробляють діаграму $M = M(\gamma)$, при цьому інтенсивність логарифмічних деформацій:

$$e_u = \frac{1}{\sqrt{3}} \ln \left(1 + 0,5\gamma^2 + 0,5\gamma \sqrt{\gamma^2 + 4} \right). \quad (6)$$

Накопичену інтенсивність деформацій розраховують по формулі:

$$\bar{e}_u = \frac{tg\gamma}{\sqrt{3}}, \quad (7)$$



а інтенсивність напружень:

$$\sigma_u = \tau \sqrt{3}. \quad (8)$$

У співвідношеннях (6, 7) γ – деформація зрушення, M – крутний момент.

З метою використання кривої течії в розрахунках технологічних процесів обробки металів тиском її апроксимують рівняннями.

Х. Свіфт пропонує формулу:

$$\sigma_u = A(e_o + e_u)^n, \quad (9)$$

де A , e_o , n – характеристики матеріалу.

Більш розповсюдженою являється апроксимація:

$$\sigma_u = A_1 e_u^{n_1}. \quad (10)$$

Для ізотропних матеріалів з анізотропним зміцненням криву течії будують у координатах: еквівалентне напруження - $\bar{\sigma}_u$; накопичена інтенсивність деформації - \bar{e}_u . Величину $\bar{\sigma}_u$ при цьому розраховують:

$$\bar{\sigma}_u = \frac{1 + \beta(e_u)}{2} \sigma_u(e_u), \quad (11)$$

де $\beta(e_u) = \frac{\sigma_{0,2}}{\sigma_u}$ – відношення умовної границі текучості на стиск після розтягу зразка до накопиченої деформації \bar{e}_u . Приймаючи за увагу апроксимації (9) і (10), одержимо:

$$\bar{\sigma}_u = \frac{1 + \beta(e_u)}{2} A(e_o + e_u)^n; \quad (12)$$

$$\bar{\sigma}_u = \frac{1 + \beta(e_u)}{2} A_1 e_u^{n_1}, \quad (13)$$

де функцію $\beta(e_u)$ можна визначити по співвідношенню (12).

Визначення параметра β , що характеризує ефект Баушингера.

З метою визначення параметра β , що характеризує схильність досліджуваних сталей

30X3МФА, 38X2МЮА, 30X3МФА після термообробки і 30X2МЮА після термообробки до деформаційної анізотропії, виготовили стандартні циліндричні зразки діаметром $d=10$ мм довжиною робочої частини $l=110$ мм.

Враховуючи відзначені вище умови, при яких попередня деформація $e_u \geq 0,05$, не викликає зміну параметра β , зразки розтягували до деформацій $e_u = 0,04; 0,1$.

Після чого з попередньо розтягнутих для дослідження зразків виготовили зразки, на одноосьовий стиск. Висота зразка $h_o = 15$ мм, діаметр $d_o = 10$ мм. Торці зразків призначених на осьовий стиск, відповідали чистоті після токарної обробки, що сприяло утриманню змазки при осадженні.

На рис. 3 показана зміна параметра β у залежності від ступеня попередньої деформації розтягу для сталі 30X3МФА після термообробки, а на рис. 4 сталі 38X2МЮА після термообробки. Крива побудована за результатами досліджень зразків двома методиками: стиск попередньо розтягнутих зразків, а також одно-зразковим способом. Як показано на рис. 3 починаючи з деформації $e_u=0,1$ величина β стає постійною і складає величину рівну $\beta_m=0,15$, а на рис. 4: - $e_u=0,15$; $\beta_m=0,15$.

Для скорочення трудомісткості одержання зазначеного параметра при будь-яких деформаціях скористаємося апроксимуючою функцією у вигляді [5]:

$$\beta = \beta_m + (1 - \beta_m) \exp(-100e_u) \quad (14)$$

Це співвідношення з високим ступенем точності показує реальну зміну β практично для всіх досліджених у роботі [5] металів.

Для одержання параметра β_u досліджуваних сталей 30X3МФА і 38X2МЮА в стані постачання і після термообробки, виготовили стандартні циліндричні зразки діаметром робочої частини ($d = 10$ мм і довжиною робочої частини $l = 100$ мм). Зразки розтягували - один до ступеня деформації

$e_u = 0,05$, а інший до ступеня деформації $e_u=0,08$. З попередньо розтягнутих зразків вирізували циліндричні зразки, призначені на осьовий стиск ($h_o = 15$ мм, $d_o = 10$ мм). Зразки

осаджували до різних ступенів деформації e_u , при цьому розраховували інтенсивність напружень σ_u .

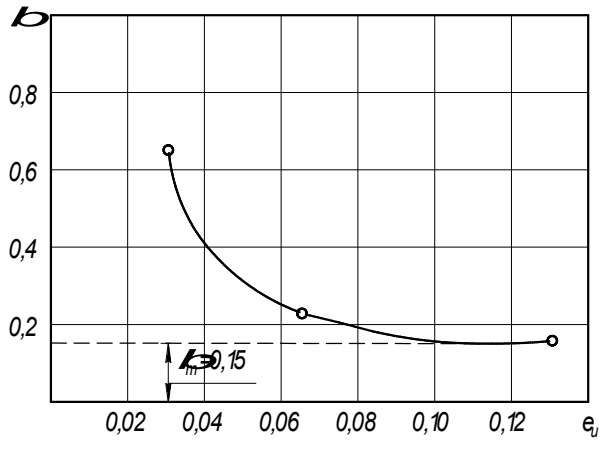
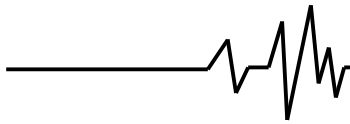


Рис. 3. Залежність параметра β від попередньої деформації розтягу ϵ_u сталі 30X3MFA після термообробки

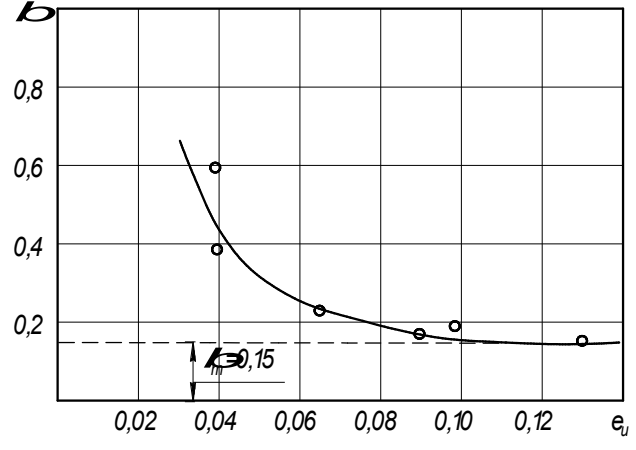


Рис. 4. Залежність параметра β від попередньої деформації розтягу ϵ_u сталі 30X3MFA після термообробки

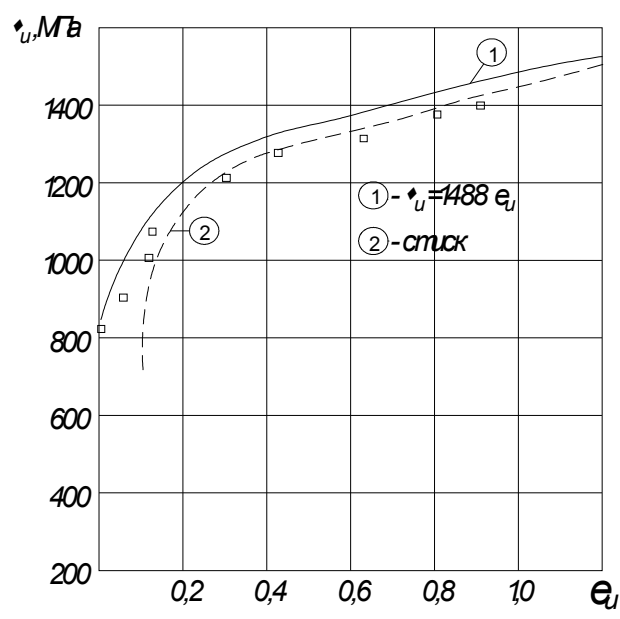


Рис. 5. Криві течії сталі 38X2MЮA після термообробки:
1- $\sigma_u = Ae_u^n$ - розтяг-стиск;
2-стиск попередньо розтягнутого зразка до деформації $\epsilon_u = 0,098$

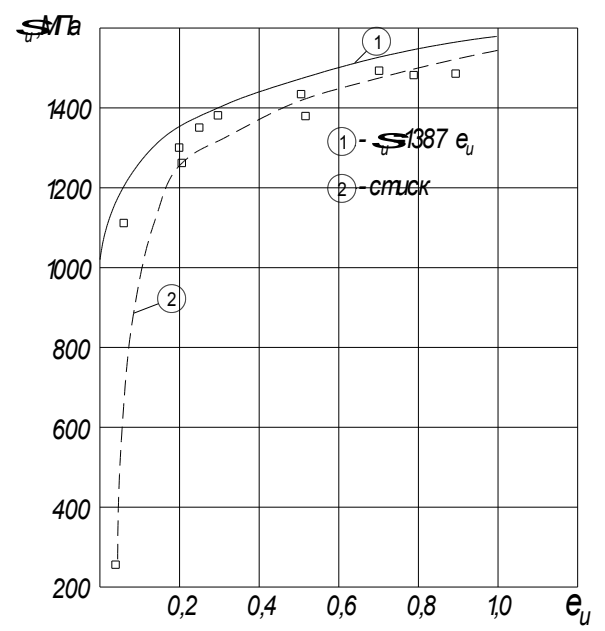
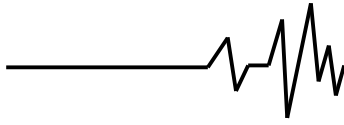


Рис. 6. Криві течії сталі 30X3MFA після термообробки:
1- $\sigma_u = Ae_u^n$ - розтяг-стиск;
2-стиск попередньо розтягнутого зразка до деформації $\epsilon_u = 0,065$.

На рис. 5 і 6 показані криві течії сталей 38X2MЮA і 30X3MFA в стані після термообробки з врахуванням ефекту Баушингера.

Отримані експериментальні дані про вплив зміни напружень текучості в зв'язку із

зміною знака деформації показали, що цей вплив для випробуваних сталей 38X2MЮA і 30X3MFA має характерний вид, властивий для більшості легованих сталей. До величини деформації $\epsilon_u=0,3$ спостерігається найбільша розбіжність величин напружень текучості і



складає близько 7,4 %. Параметр Баушингера $\beta = \beta(\epsilon_u)$ практично не залежить від властивостей досліджуваних сталей, його величина, починаючи з попередньої деформації $\epsilon_u = 0,1$ стає постійною і складає величину рівну 0,15 ($\beta = 0,15$).

Висновки

На основі робіт присвячених вивченню ефекту Баушингера і отриманих експериментальних даних можна зробити наступні висновки:

- ефект Баушингера існує в усіх металах, як у полікристалічному стані, так і в монокристалічному стані, незалежно від ступеня чистоти металу;

- ефект спостерігається як при найменших, так і при кінцевих пластичних деформаціях аж до відносної деформації 100% і більше;

- з погляду мікроскопічних уявлень ефект Баушингера задовільно пояснюється дією орієнтованих мікронапруг, основну роль у виникненні яких грає розходження в опорі пластичному деформуванню області матриці і приграничних областей (границі зерен і блоків мозаїки);

- параметр Баушингера $\beta = \beta(\epsilon_u)$ практично не залежить від властивостей досліджуваних сталей, його величина, починаючи з попередньої деформації $\epsilon_u = 0,1$ стає постійною і складає величину рівну 0,15 ($\beta = 0,15$).

Література

1. Дель Г.Д., Хван Д.В., Баланирев А.Н. Об устойчивости пластического

растяжения анизотропно упрочняющихся тел // Изв. вузов. Машиностроение. - 1983. - № 7. - С. 8-9.

2. Талыпов Г.Б. Исследование эффекта Баушингера // Известия АН СССР. Механика и машиностроение. - 1964. - № 6. - С. 131-137.

3. Талыпов Г.Б. К теории пластичности учитывающей эффект Баушингера // Инженерный журнал. МТТ. - 1966. - № 6. - С. 81-86.

4. Талыпов Т.Б. Анализ экспериментальных данных по эффекту Баушингера и их теоретическое истолкование // Инженерный журнал. МТТ. - 1966. - № 2. - С. 108-113.

5. Талыпов Т.Б. Исследование эффекта Баушингера // Изв. АН СССР. Механика и машиностроение. - 1964. - № 6. - С. 131-137.

6. Хван Д.В. Анизотропное упрочнение при немонотонном деформировании // Изв. ВУЗов. Чёрная металлургия. - 1993. - № 7. - С. 33-36.

7. Хван Д.В. Повышение эффективности в обработке металлов давлением // Воронеж: Издательство Воронежского университета, 1995. - С. 224.

8. Хван Д.В., Розенберг О.А., Цеханов Ю.А. Исследование деформационной анизотропии металлов при немонотонном пластическом деформировании в условиях линейного напряжённого состояния // Проблемы прочности. - 1990. - № 12. - С. 53-56.

9. Хван Д.В., Томилов Ф.К., Свиридов С.И. Оценка эффекта Баушингера по результатам испытаний на реверсивное кручение // Заводская лаборатория, 1977. - № 1. - С. 100-101.