

УДК 621.7

В.В. КУХАРЬ

Национальная металлургическая академия Украины, г. Днепропетровск,  
Приазовский государственный технический университет, г. Мариуполь

## КРИТЕРИАЛЬНЫЙ АНАЛИЗ БЕСШТАМПОВОГО ФОРМООБРАЗОВАНИЯ УДЛИНЕННЫХ ПОКОВОК С ЗАОСТРЕННЫМ КОНЦОМ

*Розроблені критерії оцінки формозміни при бесштамповому профілюванні заготовок способом розтягування із розривом та запропоновані методики їх розрахунку із врахуванням об'єму металу, що перерозподіляється, та енергосилових витрат на деформування. Визначений характер функціонального зв'язку даних критеріїв оцінки формозміни із роботою деформації.*

*Parameters for estimate of shape changing during the profiling of billets without dies by the method of extension with a breach are carry out and successiveness of their calculate with means of a volume of metal irregular distribution and power expend during deformation is proposed. The character of functional connection of those parameters for estimate of shape changing with work of deformation is determinate.*

Ключові слова: неравномерность деформации, профелирование, растяжение с разрывом заготовки, работа деформации.

### Введение

Одной из основных задач при разработке экономичных и эффективных технологий обработки металлов давлением является улучшение показателей точности процессов за счет приближения формы заготовки к конфигурации готового изделия. Выполнение подготовительных операций для обеспечения необходимого перераспределения металла на дополнительном профилирующем оборудовании является малорациональным, особенно в современных условиях многономенклатурного производства неопределенной серийности. При использовании установленного производственного оборудования также стремятся сократить количество технологических переходов и минимизировать работу деформирования. Для повышения технико-экономических показателей целесообразно применение бесштамповых способов профилирования заготовок под штамповку [1, 2], причем в случаях получения удлиненных поковок с заостренным концом (типа «зубило пикообразное», «зуб бороны» и т.п.) операции свободного формоизменения могут быть завершающими.

### Анализ предыдущих исследований и публикаций

Согласно разработанной концепции бесштампового профилирования [1, 2], удлиненные поковки с заостренным концом могут быть получены способами растяжения с разрывом заготовки [3, 4], при этом образуются два изделия одинаковой конфигурации. Известна конструкция технологической машины для разрыва заготовок [5], которая содержит закалочное устройство для получения требуемых эксплуатационных свойств поковок. Возможно одновременное растяжение нескольких заготовок. С целью прогнозирования места разрыва и формообразования заострения используют местный нагрев, например, индукционным способом. Однако неизученным остается влияние длины участка разогрева на формирование неравномерности деформации, для выражения которой необходима разработка критериев оценки.

Основной мерой параметрической оценки формоизменения принято считать степень деформации  $\epsilon$  [6], определяемую по соотношению начальных и конечных габаритных размеров заготовки, что при бесштамповых способах профилирования не в полной мере характеризует особенности формообразования, не позволяя отражать неравномерность деформации. В практике методов оценки неравномерности деформации широко используют критерии, основанные на соотношении линейных размеров локальных участков заготовки до и после формоизменяющей операции, площадей поперечных сечений или местных объемов ко всему объему заготовки [6, 7]. Опираясь на результаты, полученные геометрическими методами, совмещаемыми с расчетно-аналитическими подходами, оценивают напряженно-деформированное состояние и работу деформации. Определение вида и количества контролируемых размеров является основой для разработки схемы обмера заготовки при экспериментальных исследованиях или в процессах моделирования. При этом критерии оценки формоизменения должны иметь пропорциональную связь с работой, затрачиваемой на перераспределение металла заготовки. Закономерности, учитывающие взаимосвязь данных критериев оценки неравномерности деформации с работой, затрачиваемой на деформирование, до настоящего времени не установлены.

### Цель работы

Разработка критериев оценки формоизменения при растяжении с разрывом заготовок при различных длинах участков местного нагрева, установление порядка их расчета с определением аналитической взаимосвязи с работой деформации.

### Материалы и результаты исследований

Базовым критерием, характеризующим формоизменение заготовки при профилировании, является

величина работы, которую необходимо затратить для осуществления перераспределения металла. Полную работу ( $A$ ) деформации и удельную работу ( $A_y$ ), приходящуюся на формоизменение единицы объема заготовки, вычисляют по известным выражениям [7]:

$$A = V_{\text{заг}} \cdot p_{\text{ср}} \cdot \varepsilon \quad \text{и} \quad A_y = p_{\text{ср}} \cdot \varepsilon, \quad (1)$$

где  $p_{\text{ср}}$  – среднее удельное давление за путь деформирования до степени деформации  $\varepsilon$ , определяемое как

$$p_{\text{ср}} = \frac{1}{\varepsilon} \int_0^{\varepsilon} p(\varepsilon) d\varepsilon, \quad (2)$$

где  $p(\varepsilon)$ , – функция изменения удельного давления за путь деформирования при заданных условиях.

Объем металла, подвергающейся перераспределению, – смещенный объем заготовки  $V_{\text{см}}$ , знание величины которого позволяет определять степень деформации заготовки:  $\varepsilon = V_{\text{см}}/V_{\text{заг}}$ . Соответственно, работа деформации может быть найдена как  $A = p_{\text{ср}} \cdot V_{\text{см}}$  [7]. Вычисление смещенного объема проводят аналитически, ориентируясь на форму инструмента и закономерности течения металла.

Рассмотрим задачу определения смещенного объема при получении поковок с заостренным концом способом растяжения с разрывом заготовок при дифференцированном разогреве участка формообразования. Использование местного разогрева позволяет локализовать очаг деформации, объем которого  $V_{\text{од}}$ , приходящийся на две спаренные заготовки, вычисляют как  $V_{\text{од}} = F_0 \cdot l_{\text{н}}$ , где  $F_0$  – площадь поперечного сечения заготовки,  $l_{\text{н}}$  – длина участка нагрева (рис. 1,а). Заостренные концы характеризуются малой площадью торцевых участков  $F_{\text{к}}$  и длиной каждого заострения  $l_{\text{к}}$  (см. рис. 1,б).

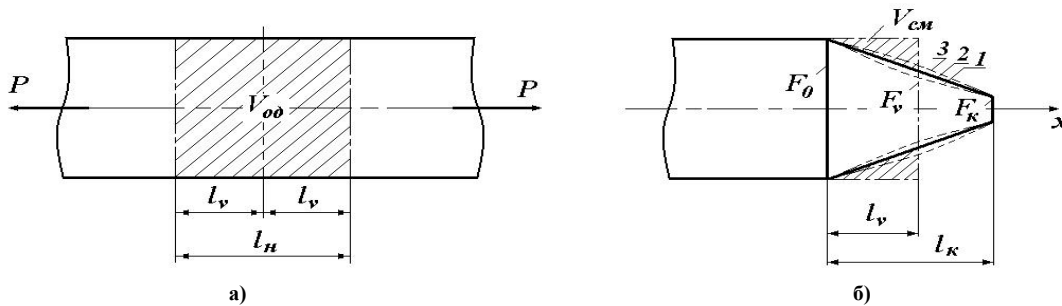


Рис. 1. Схема определения смещенного объема при растяжении с разрывом заготовки: а – участок разогрева стержневой спаренной заготовки, б – разделение заготовки на две части с формированием заострения; 1, 2 и 3 – вогнутая, прямолинейная и выпуклая формы образующих заостренной части соответственно

Смещенный объем определяют как разность объема очага деформации, приходящегося на одну поковку ( $V_{\text{од}}/2$ ), и объема усеченного конуса (или призмы, в зависимости от формы поперечного сечения исходной заготовки) высотой  $l_{\text{к}}$  с основаниями  $F_0$  и  $F_{\text{к}}$  (см. рис. 1):

$$V_{\text{см}} = \frac{V_{\text{од}}}{2} - \frac{F_0 + F_{\text{к}}}{2} \cdot l_{\text{к}}, \quad (3)$$

где  $l_{\text{в}} = l_{\text{н}}/2 = (V_{\text{од}}/2)/F_0$  – длина очага деформации, приходящегося на одну поковку;

$F_{\text{в}}$  – площадь поперечного сечения конуса (или призмы) на расстоянии  $l_{\text{в}}$  от начала очага деформации с основанием  $F_0$ .

В зависимости от условий нагрева и деформирования конфигурация заострения может иметь различную форму образующей (см. рис. 1,б): вогнутую, прямолинейную и выпуклую. В случае прямолинейной образующей закономерность изменения площади поперечного сечения  $F$  профилированной заготовки вдоль оси  $x$  определяется выражением:

$$F = \alpha x + \beta, \quad (4)$$

где  $\alpha = (F_{\text{к}} - F_0)/l_{\text{к}}$  и  $\beta = F_0$  – коэффициенты, определяемые из граничных условий.

При криволинейной образующей заострения его профиль можно аппроксимировать выражением:

$$F = ax^2 + bx + c, \quad (5)$$

где  $a = -(F_{\text{к}} - F_0)/l_{\text{к}}^2$ ,  $b = -2al_{\text{к}}$  и  $c = F_0$  – коэффициенты, определяемые из граничных условий или графоаналитическим способом.

Таким образом, величину  $F_{\text{в}}$  находим из выражений (4) или (5) при  $x = l_{\text{в}}$ :

$$F_{\text{в}} = \frac{F_{\text{к}} - F_0}{l_{\text{к}}} \cdot \frac{V_{\text{од}}/2}{F_0} + F_0 \quad \text{или} \quad F_{\text{в}} = -\frac{F_{\text{к}} - F_0}{l_{\text{к}}^2} \cdot \left(\frac{V_{\text{од}}/2}{F_0}\right)^2 + 2 \cdot \frac{F_{\text{к}} - F_0}{l_{\text{к}}} \cdot \left(\frac{V_{\text{од}}/2}{F_0}\right) + F_0. \quad (6)$$

Подставляя уравнения (6) в выражение (3) и проводя преобразования, получим для прямолинейной образующей:

$$V_{\text{см}} = \frac{1}{2} \cdot \frac{F_0 - F_{\text{к}}}{l_{\text{к}}} \cdot \left(\frac{V_{\text{од}}/2}{F_0}\right)^2, \quad (7)$$

а для случаев с криволинейной вогнутой и выпуклой образующей соответственно:

$$V_{\text{см}} = \frac{F_k - F_0}{2 \cdot l_k} \cdot \left( \frac{V_{\text{од}}/2}{F_0} \right)^2 \cdot \left( \frac{1}{l_k} \cdot \left( \frac{V_{\text{од}}/2}{F_0} \right) - 2 \right) \quad \text{и} \quad V_{\text{см}} = \frac{F_k - F_0}{2 \cdot l_k} \cdot \left( \frac{V_{\text{од}}/2}{F_0} \right)^2 \cdot \frac{1}{\left( \frac{1}{l_k} \cdot \left( \frac{V_{\text{од}}/2}{F_0} \right) - 2 \right)}. \quad (7^*)$$

Для данного случая степень деформации вычисляют как  $\epsilon = 2V_{\text{см}}/V_{\text{од}}$ .

Величина работы формоизменения заготовки при профилировании пропорциональна так называемому коэффициенту подкатки  $K_{\text{по}}$  [6]. В общем случае, его находят как отношение максимальной площади  $F_{\text{max}}$  поперечного сечения профилированной заготовки к средней площади  $F_{\text{ср}}$ , определяемой делением объема на длину заготовки, или, соответственно:  $K_{\text{по}} = F_{\text{max}}/F_{\text{ср}} = D_{\text{max}}^2/D_{\text{ср}}^2$ , где  $D_{\text{max}}$  и  $D_{\text{ср}}$  – максимальный и усредненный диаметр профилированного полуфабриката. Следовательно, критерии формоизменения, вычисляемые по соотношению площадей поперечных сечений заготовки, и квадраты критериев, основанных на соотношении линейных размеров локальных участков профилированной заготовки, также имеют пропорциональную связь с работой деформации. Для оценки процесса растяжения с разрывом заготовки целесообразно использовать критерии вида:

$$K_F = F_0/F_k; \quad K_{\text{по}} = F_0/F_{\text{ср}}; \quad K_{\text{ис}} = F_0/F_c, \quad (8)$$

где  $F_{\text{ср}} = V_{\text{од}}/2l_k$  и  $F_c = (F_0 + F_k)/2$ .

В результате проведения серии экспериментов по растяжению с разрывом заготовок из стали 55Г с местным разогревом до 1000 °С и обработки опытных данных получены регрессионные математические модели, позволяющие вычислять значимые параметры с коэффициентом детерминации не менее  $R_\alpha = 0,993$ :  
 - относительное удлинение, при котором происходит разрыв заготовки:

$$\delta_k = 2,245 \cdot (l_n/\sqrt{F_0}) - 1,211; \quad (9)$$

- площадь торцевого участка заострения:

$$F_k = \left[ 0,0796 \cdot \left( \frac{l_n}{d_e} \right)^2 - 0,3231 \cdot \frac{l_n}{d_e} + 0,3446 \right]^2 \cdot F_0, \quad (10)$$

где  $d_e = 1,13\sqrt{F_0}$  – эквивалентный диаметр.

Конечную длину заострения после разрыва определяют как  $l_k = (l_n/2) (1 + \delta_k)$ . В свою очередь, длину участка нагрева, приходящегося на две поковки, можно подбирать, ориентируясь на длину заострения  $l_{\text{кп}}$ , определяемого по чертежу поковки:

$$l_n = 1,292 \cdot l_{\text{кп}} + 0,094 \cdot \sqrt{F_0}. \quad (11)$$

Экспериментальная зависимость усилия ( $P$ ) растяжения заготовок от текущего относительного удлинения  $\delta$  при различных отношениях  $l_n/d_e$  приведена к удельному виду  $p = P/F_0$  и показана на рис. 2. Функциональное описание зависимости  $p(\delta)$  для данного случая аппроксимировано выражением:

$$p(\delta) = a_0 \cdot \delta^{a_1} \cdot e^{-k \cdot \delta}, \quad (12)$$

где  $a_0 = 135,56 - 24,25 \cdot (l_n/\sqrt{F_0})$ ;  $a_1 = 0,514 + 0,314 \cdot \ln(l_n/\sqrt{F_0})$ ;  $k = 1,4$ .

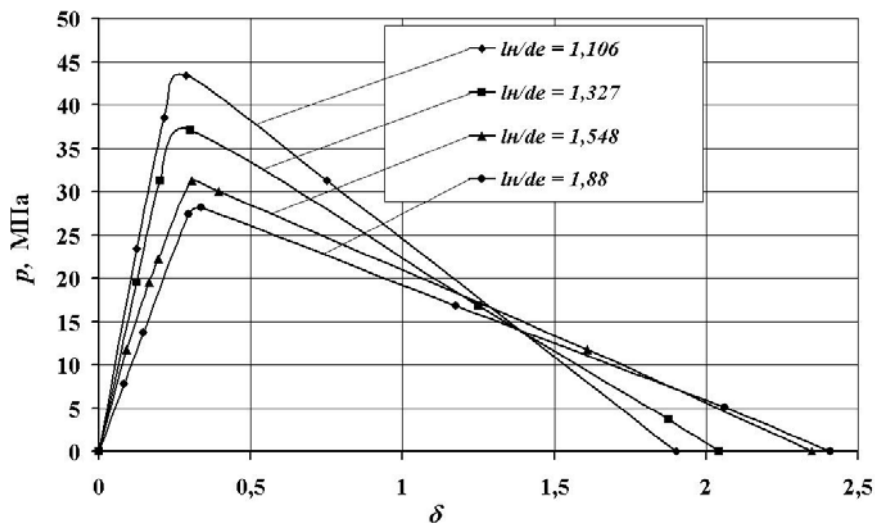


Рис. 2. Зависимость удельного усилия ( $p$ ) растяжения с завершающим разрывом заготовки от относительного удлинения ( $\delta$ ) при различных величинах  $l_n/d_e$  (сталь 55Г, 1000 °С)

Тогда среднее удельное давление за весь путь деформирования, согласно формуле (2), вычисляется как:

$$p_{cp} = \frac{1}{\delta_k} \int_0^{\delta_k} a_0 \cdot \delta^{a_1} \cdot e^{-k \cdot \delta} d\delta. \quad (13)$$

Таким образом, становится возможным определение затрат работы на формоизменение заготовки до разрыва по выражениям (1) и анализ корреляции между предложенными критериями формоизменения (8) и удельной работой деформации  $A_y$ . Результаты критериального анализа, проведенного с использованием формулы (7), приведены на рис. 3 и рис. 4. Зависимости коэффициентов неравномерности деформации и работы формоизменения от относительной длины участка нагрева заготовки показаны на рис. 3. Увеличение коэффициента подкачки  $K_{no}$  происходит прямопропорционально росту относительной длины  $l_n/d_e$  участка нагрева, что связано с вовлечением в очаг деформации большего объема металла, пластическая вытяжка которого при растяжении сопровождается формированием более тонкой шейки и, соответственно, острой торцевой части при разрыве. Уменьшение площади поперечного сечения  $F_k$  при увеличении величины  $l_n/d_e$  приводит к резкому возрастанию коэффициента  $K_F$  (для выполнения условий масштабирования принято  $K_F/1000$ ), которое может быть описано степенной закономерностью или полиномом четвертой степени в промежутке  $l_n/d_e = 1,0 \div 2,0$  (см. рис. 3). Незначительный рост критерия  $K_{nc}$  с увеличением  $l_n/d_e$  связан с усреднением площади поперечного сечения. При возрастании относительной длины участка нагрева наблюдается снижение требуемой удельной работы деформации в связи с уменьшением энергосиловых затрат на формоизменение, однако, здесь необходимо принимать во внимание рост энергетических затраты на нагрев большего объема металла.

В результате критериального анализа процесса растяжения с разрывом заготовки установлен характер пропорциональной связи между критериями неравномерности деформации и работой формоизменения (рис. 4).

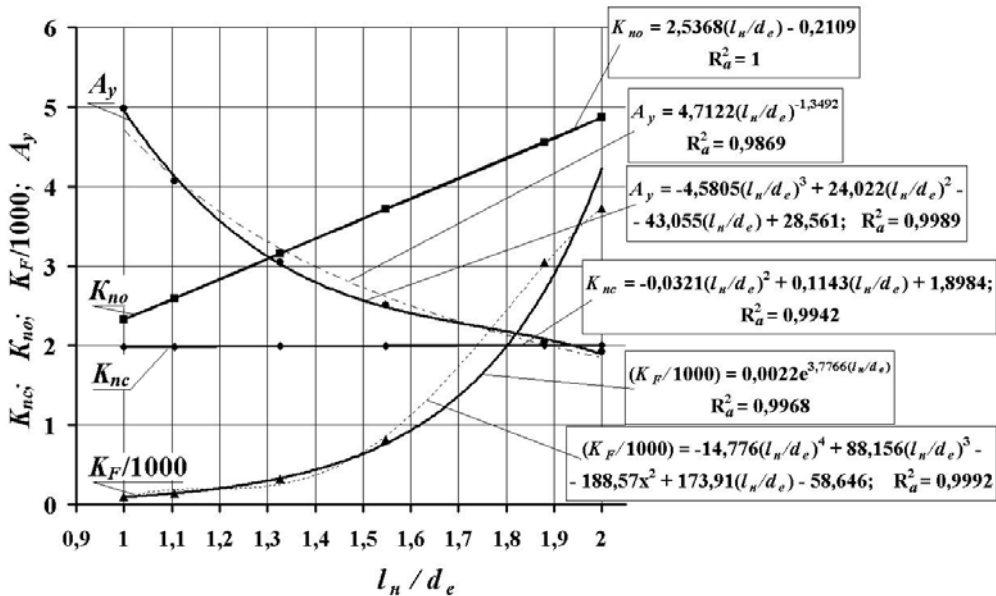


Рис. 3. Зависимости критериев формоизменения при растяжении с разрывом заготовки от относительной длины участков местного нагрева  $l_n/d_e$  (сталь 55Г, 1000 °С)

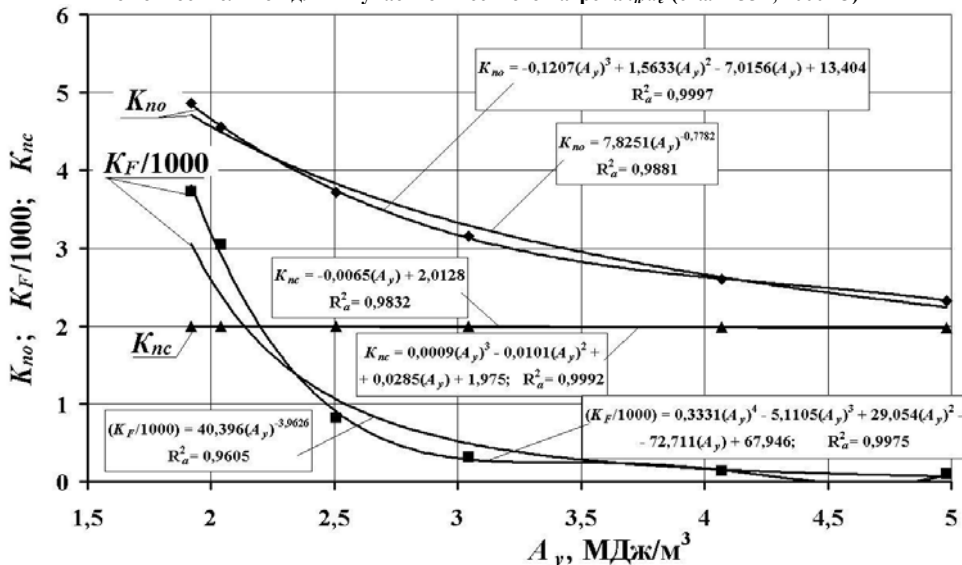


Рис. 4. Функциональная взаимосвязь критериев формоизменения при растяжении с разрывом заготовки с удельной работой деформации (сталь 55Г, 1000 °С)

Учитывая, что рост величины удельной работы деформации связан с минимизацией размеров зоны местного разогрева, следует отметить энергетические преимущества процесса формообразования удлиненных поволоков с заостренным концом способами растяжения с разрывом заготовки, когда при уменьшении удельной работы, затрачиваемой на формоизменение, наблюдается рост значений критериев неравномерности деформации. Для функциональной связи коэффициентов  $K_{no}$  и  $K_F$  с удельной работой формоизменения характерны степенные закономерности, а в общем случае, зависимости критериев формоизменения от  $A_1$  описаны полиномами различных степеней (см. рис. 4).

### Выводы

Процессы бесштампового профилирования заготовок способами растяжения с разрывом позволяют достигать значительного формоизменения при снижении величины удельной работы деформации. Предложенные критерии оценки полезной неравномерности деформации и разработанная методика их расчета учитывают относительный объем перераспределенного металла и энергосиловые затраты на осуществление формоизменения, при этом между критериями формоизменения и работой деформации установлена пропорциональная связь. Перспективами исследований в данном направлении является проведение оценки технологической наследственности изделий в местах формирования заострений.

### Литература

1. Кухарь В. В. Основы бесштампового профилирования заготовок на прессах / В. В. Кухарь, В. А. Гринкевич // Прогрессивные методы и технологическое оснащение процессов обработки металлов давлением: материалы междунар. научно-техн. конф., посвященной 75-летию кафедры «Высокоэнергетические устройства автоматических систем» БГТУ «Военмех». – СПб: Военмех, 2009. – С. 101–104.
2. Гринкевич В. А. Разработка концепции бесштампового профилирования заготовок на прессах с повышением точности формоизменения на окончательных операциях // В. А. Гринкевич, В. В. Кухарь, К. К. Диамантопуло // Вестник Национального технического университета «ХПИ»: сб. науч. тр. Тематический выпуск: Новые решения в современных технологиях. – Харьков: НТУ «ХПИ», 2009. – № 32. – С. 26-32.
3. Пат. 18568 Україна, МПК (2006), B21J 5/00. Спосіб одержання заготовок з заостреним кінцем / Диамантопуло К. К., Сердюк О. І., Диамантопуло Ю. К.; заявник та патентовласник Приазовський держ. техн. ун-т. – № u200605103; заявл. 10.05.2006; опубл. 15.11.2006, Бюл. № 11. – 2 с.
4. Пат. 24977 Україна, МПК (2006), B21J 5/00. Спосіб одержання подвоєної заготовки для безвідходного штампування / Диамантопуло Ю. К.; заявник та патентовласник Приазовський держ. техн. ун-т. – № u200701522; заявл. 13.02.2007; опубл. 25.07.2007, Бюл. № 11. – 2 с.
5. Пат. 19382 Україна, МПК (2006), B21J 5/00. Машина для виробництва поволоков типу стрижня з заостреним кінцем / Диамантопуло К. К., Сердюк О. І., Диамантопуло Ю. К., Литвин А. М., Мкртчян Е. А.; заявник та патентовласник Приазовський держ. техн. ун-т. – № u2006606600; заявл. 13.06.2006; опубл. 15.12.2006, Бюл. № 12. – 3 с; іл.
6. Охрименко Я. М. Технология кузнечно-штамповочного производства / Охрименко Я. М. – М.: Машиностроение, 1966. – 599 с.
7. Сторожев М. В. Теория обработки металлов давлением / М.В. Сторожев, Е. А. Попов. – М.: Машгиз, 1977. – 324 с.

Надійшла 9.09.2010р.

УДК 620.178.1

В.С. ПАВЛОВ

Хмельницький національний університет

## ВИЗНАЧЕННЯ КОЕФІЦІЄНТА ЗАПАСУ ЗА ПРОСТИХ ОПОРІВ

*Встановлено, що за простих опорів віртуальні і дійсні напруження можуть суттєво відрізнятись. Коефіцієнти запасу, визначені з використанням компонентів віртуального і дійсного напружених станів, однакові. It is set that at simple resistances virtual and actual tensions can substantially differ. The coefficients of supply, certified with the use of components virtual and actual tense states, are identical.*

Ключові слова: напруження, напружений стан, коефіцієнт запасу.

### Вступ

Оцінка міцності елемента механізму чи конструкції за відомим напруженим станом є однією з найважливіших інженерних задач [1, с.180].

Мірою міцності є коефіцієнт запасу:

$$n = K_L / K, \quad (1)$$

де  $K_L$  і  $K$  – відповідно граничне і максимальне значення критерію міцності в небезпечній точці деталі