

АНАЛІЗ ТА ВИБІР КРИТЕРІЮ ЛОКАЛЬНОГО РУЙНУВАННЯ ПІД ЧАС ІМІТАЦІЙНОГО МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСІВ РІЗАННЯ У СИСТЕМІ DEFORM 2D

© Ступницький В.В., 2012

Проаналізовані найрозповсюдженіші критерії руйнування матеріалів у реологічних САЕ-моделях різання. Наведено результати імітаційного моделювання процесу різання з використанням різних критеріїв. Подано рекомендації щодо доцільності їх використання під час механічного оброблення різних матеріалів

In the article the conducted analysis of the most widespread criteria of materials destruction is in reological CAE cutting models. The brought results over of imitation design of cutting process with the use of different criteria. The given recommendations are about expedience of the use of criteria during treatment of different materials.

Постановка проблеми. Як показали численні дослідження та аналіз результатів імітаційного моделювання у САЕ-системах Deform 2D(3D), ABAQUS, Advantedge, LS Dyna [1], вибір критерію руйнування істотно впливає на адекватність реологічної моделі різання. Врахування різних характеристик матеріалу в зоні стружкоутворення під час розтягування і стискування дає змогу адекватніше моделювати процес різання, але збільшення кількості незалежних міцнісних характеристик пред'являє вищі вимоги до експериментальних даних. Врахування проміжних станів матеріалу заготовки під час різання у межах механіки локального руйнування вимагає аналізу існуючих розрахункових концепцій та моделей. В основі класичної теорії руйнування лежать моделі, що ґрунтуються на критеріях руйнування. Їх умовно поділяють на три групи: енергетичні, силові та деформаційні критерії.

Необхідно відзначити, що єдиної концепції для аналітичного описання механізмів руйнування не існує, так само, як і універсального критерію руйнування, за яким однозначно можна було б говорити про фізику процесу різання [2–6]. Сьогодні можна говорити про добру теоретичну розробленість лише окремих випадків і спроби їх узагальнення.

Аналіз існуючих підходів до описання теорії руйнування у процесах різання [1, 5] дає змогу відзначити такі характерні особливості:

1. Існуючі підходи до описання кінетики різання прийнятні на початку процесу руйнування матеріалу заготовки і під час виконання завдань у першому наближенні.

2. Модель процесу має ґрунтуватись на описанні фізики процесу різання, а не статистичних експериментальних даних.

3. Потрібно використовувати замість співвідношень лінійної теорії пружності фізично нелінійних співвідношень форми заготовки та стружки, що враховують зміни і об'єму тіла за великих деформацій.

4. Експериментальні методи здатні однозначно надати інформацію про механічну поведінку матеріалу у заданому діапазоні температури і параметрів процесу різання.

Враховуючи вищевикладене, важливим етапом цієї наукової роботи є створення реологічної моделі руйнування, що дає змогу на підставі універсальних визначальних співвідношень розглянути усі стадії процесу різання, починаючи із стадії пружної деформації і закінчуючи стадією розділення стружки, формоутворення заготовки і досліджувати закономірності процесу зняття стружки.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Серед найрозповсюдженіших законів стану матеріалу за великих деформацій найпоширеніший еластотеплов'язкопластичний закон Джонсона–Кука [6]. Він враховує адіабатичні зсувні явища, викликані великими пластичними деформаціями і значними градієнтами температур. Цей закон встановлює залежність напруження σ від міри ϵ (%) і швидкості деформації $\dot{\epsilon}$, а також від температури T , і може бути розкладений у мультиплікативній формі на три множники:

$$\sigma = (\sigma_{T_0} + A\epsilon^n) \cdot \left(1 + C_1 \ln \left(\frac{\dot{\epsilon}}{\dot{\epsilon}_0} \right) \right) \cdot \left(1 - \left[\frac{T - T_0}{T_f - T_0} \right]^m \right), \quad (1)$$

де $\dot{\epsilon}$ і T_0 – швидкість деформації і температура; σ_{T_0} – межа плинності матеріалу за кімнатної температури; T_f – температура плавлення металу; A – коефіцієнт чутливості до деформації; C_1 – коефіцієнт чутливості до швидкості деформації; n – параметр, що відповідає за деформаційне зміцнення; m – параметр, що характеризує температурний відпуск;

Отже, перший множник описує явище наклепу, другий – динамічні процеси, третій – явища відпуску. Множник, пов'язаний з наклепом, відповідає напруженню перебігу постійної швидкості деформації. Другий множник – мультиплікативний чинник, що характеризується динамікою зміцнення матеріалу. Він залежить від еквівалентної швидкості пластичної деформації. Третій множник – чинник, що відповідає явищу теплового відпуску.

Приклади результатів розрахунку параметрів моделі Джонсона–Кука для найхарактерніших машинобудівних матеріалів наведені в табл. 1 [6].

Таблиця 1

Константи для деяких матеріалів у моделі Джонсона–Кука

Матеріал	$\sigma_{T_0}, \text{МПа}$	$A, \text{МПа}$	n	C_1	m
Конструкційна сталь 35	245	275	0,36	0,022	1,0
Чавун СЧ20	175	380	0,32	0,06	0,55
Легована сталь 40Х2Н2МА	792	510	0,26	0,016	1,03
Сплав Тi6Al4V	1098	1092	0,93	0,014	1,1
Інструментальна сталь Р6М5	1539	477	0,18	0,012	1,0

Процес стружкоутворення ґрунтується на методі «ерозії елементів», який полягає в еволюції тріщини, що залежить від стану напруження та деформацій у тілі заготовки. Застосування такого закону включає два критерії. Перший критерій характеризує необхідну міру руйнування матеріалу, а другий – відповідає за еволюцію тріщини, її поширення і рух дислокацій.

Адаптований критерій руйнування взаємопов'язаний із законом руху Джонсона–Кука. Руйнування почнеться для кожного елемента, починаючи з моменту, коли

$$\omega = \sum \frac{\Delta \bar{\epsilon}}{\bar{\epsilon}_f},$$

де $\Delta \bar{\epsilon}$ – інкремент результуючої пластичної деформації; $\bar{\epsilon}_f$ – результуюча деформація руйнування матеріалу.

Причому руйнування в матеріалі починається за $w=1$.

Модель руйнування Джонсона–Кука враховує термомеханічні процеси за великих деформацій. Значення результуючої пластичної деформації руйнування подано у вигляді [6]:

$$\bar{\epsilon}_f = \left[D_1 + D_2 \cdot \exp(D_3 \cdot \sigma^o) \right] \cdot \left[1 + D_4 \cdot \ln \bar{\epsilon}^o \right] \cdot \left[1 + D_5 \cdot T^o \right], \quad (2)$$

де $\sigma^o = \sigma_m / \sigma_o$ – відношення середнього напруження (σ_m) результуючого еквівалентного напруження (по Мізесу) ($\bar{\sigma}$); $\varepsilon^o = \dot{\varepsilon} / \dot{\varepsilon}_o$ – безрозмірний коефіцієнт залежності пластичної деформації з розрахунковою швидкістю деформації $\dot{\varepsilon}$ і нормалізованою межею чутливості до швидкості деформації $\dot{\varepsilon}_o$; $T^o = (T - T_o) / (T_f - T_o)$ – температурний коефіцієнт еквівалентності, що визначає відношення різниці поточної і початкової температури до різниці температури плавлення T_f до початкової температури T_o заготовки у зоні різання; D_1 – початкове значення деформації руйнування; D_2 – нормативний експоненційний фактор; D_3 – фактор тривісності; D_4 – фактор швидкості деформації; D_5 – нормативний тепловий фактор [4].

Після виконання умови (2), коли інкремент результуючої пластичної деформації ($\Delta \bar{\varepsilon}$) перевищує результуючу деформацію руйнування матеріалу ($\bar{\varepsilon}_f$), вступає в силу критерій розвитку руйнування, що характеризується рівнем енергії [U_f], необхідним для розвитку тріщини. Ця енергія визначається відношенням показника стійкості руйнування K_c до модуля Юнга E для цього матеріалу заготовки:

$$[U_f] = \frac{K_c^2 \cdot (1 - \mu^2)}{E}, \quad (3)$$

де μ – коефіцієнт Пуассона, що визначає пружні властивості матеріалу

Коли показник енергії на вершині ґратки досягає значення [U_f], цей елемент зникає з сітки і на його місці виникає тріщиноподібна впадина, яка розвивається у напрямку подачі різального клина, частина матеріалу відокремлюється, утворюючи при цьому стружку. Перевищення енергетичного рівня по усьому перетині стружки сприяє її руйнуванню і відокремленню від заготовки у вигляді сегментів.

У дещо спрощеному вигляді деформаційну модель локального руйнування під час різання металів можна описати залежністю Купера–Саймонда, що враховує пряму залежність межі плинності від швидкості деформації (*strain rate*) [6]. Для врахування швидкості деформації $\dot{\varepsilon}$ на S_T вводимо масштабний коефіцієнт b :

$$\begin{aligned} \sigma_T^{\text{дин}} &= \sigma_T \cdot \beta; \\ \beta &= 1 + \left(\frac{\dot{\varepsilon}}{C} \right)^{1/P}, \end{aligned} \quad (4)$$

де $\sigma_T^{\text{дин}}$ – поточна межа плинності; P, C – константи, що залежать від матеріалу заготовки [6].

Критерієм руйнування є досягнення пластичною деформацією ε^p (*strain*) граничного значення [ε_B]:

$$\begin{aligned} \varepsilon^p &> [\varepsilon_B]; \\ \varepsilon^p &= \int_0^t \left(\frac{2}{3} \dot{\varepsilon}_{ij}^p \right)^{0,5} dt, \end{aligned} \quad (5)$$

де $\dot{\varepsilon}_{ij}$ – компоненти тензора швидкостей пластичної деформації.

Розповсюдженим деформаційним критерієм руйнування є критерій МакКлінтока [2, 12]. За цією теорією, здатність пластичного матеріалу заготовки до руйнування силовою дією різального клина може бути оцінена порівнянням напружено-деформованого стану зі станом ідеального пластичного матеріалу. За великих концентрацій деформацій, як, наприклад, на вершині різального

клина інструмента, пластичне руйнування може відбутися за номінальних напружень зсуву, менших від межі плинності [6].

Якщо припустити, що руйнування заготовки відбудеться за поздовжнього зсуву, коли в області r_s матеріалу (деформація текучості якого дорівнює ϵ_T) пройшла сумарна деформація $\epsilon_T^{\text{дін}}$, то за зсуву тріщина завдовжки c стане нестабільною, коли дотичне напруження S_{23} досягне критичної величини:

$$\sigma_{23} = G \cdot \epsilon_T \sqrt{\rho_s \left[\exp \left(\sqrt{\frac{2\epsilon_T^{\text{дін}}}{\epsilon_T}} - 1 \right) \right] / c}. \quad (6)$$

Ця тенденція до руйнування і створення зони нестабільності може бути описана за допомогою наближеного розміру пластичної зони або коефіцієнта інтенсивності напружень пружного поля.

Проте усі ці силові та деформаційні критерії у випадку моделювання процесів різання унеможливають під час моделювання отримати адекватну картину руйнування заготовки та зношування інструмента. Здебільшого вони дають занижені значення критичних напружень і деформацій під час моделювання процесів механічного оброблення [1, 5]. Проте за допомогою підпрограм користувача в універсальних системах можуть бути використані й інші критерії руйнування.

До спеціалізованих програм, що дають змогу досліджувати пластичні деформації у зоні різання, належать такі програмні продукти: DEFORM 3D (2D), ABAQUS, AdvantEdge, LS-Dyna. Найфункціональніші автоматизовані системи моделювання технологічних процесів, такі як DEFORM, за можливостями моделювання руйнування за пластичної деформації істотно переважають універсальні системи. У них реалізовано доволі багато критеріїв руйнування, таких як нормалізований критерій Кокрофта–Лейтема [8]:

$$D = \int \frac{\bar{\epsilon}}{\bar{\sigma}} \frac{\sigma_{\max}}{\sigma} d\bar{\epsilon}, \quad (7)$$

де $\bar{\epsilon}$ – накопичена еквівалентна деформація; σ_{\max} – максимальне ефективне напруження (*effective stress*); $\bar{\sigma}$ – еквівалентне напруження по Мізесу.

Іншим енергетичним критерієм є критерій Райса–Трейсі [13]:

$$D = \int e^{\frac{\alpha \sigma_m}{\bar{\sigma}}} d\bar{\epsilon}, \quad (8)$$

де α – коефіцієнт, що залежить від властивостей матеріалу; σ_m – гідростатичний тиск.

Критерії руйнування Кокрофта–Лейтема і Райса–Трейсі є енергетичними і ґрунтуються на обчисленні потенційної енергії пластичної деформації, тобто площі фігури, що обмежується кривою деформація-напруження. Енергетичні критерії дають змогу доволі адекватно оцінювати можливість руйнування заготовки за сталих режимів різання з нескладною траєкторією руху інструмента. Такі критерії вважаються універсальними і, як правило, не потребують додаткових експериментальних досліджень механічних властивостей матеріалу заготовки і інструмента. У той самий час вони не враховують багато важливих особливостей поведінки матеріалу заготовки під час оброблення поверхонь зі складною геометрією, що інструмент різко змінює напрям подачі, швидкість різання, що призводить до зниження критичних напружень і деформацій, а відтак до неадекватного описання та реологічної моделі руйнування і спотворення результатів імітаційного моделювання процесу різання.

Отже, критерії руйнування, які можливо ефективно використовувати у кінцево-елементних системах моделювання, призначених для аналізу двовимірної (2D) або тривимірної (3D) реології металу за різних процесів обробки різанням, таких як Deform 2D (3D), LS-Dyna, ABAQUS або AdvantEdge, можна подати у вигляді табл. 2.

Загальна характеристика найрозповсюдженіших критеріїв руйнування в САЕ-системах

№ з/п	Назва критерію	Узагальнена модель руйнування
1	Критерій Фроденталя [7]	$D_1 = \int \bar{s} d\bar{e}$
2	Критерій Кокрофта–Лейтема [8]	$D_2 = \int \frac{\bar{S}}{\bar{s}} d\bar{e}$
3	Критерій МакКлінтока [2,12]	$D_3 = \int \left[\frac{2}{\sqrt{3}(1-n)} \sinh \left\{ \frac{\sqrt{3}(1-n)}{2} \cdot \frac{S_b + S_a}{\bar{s}} \right\} + \frac{S_b - S_a}{\bar{s}} \right] d\bar{e}$
4	Критерій Райса–Трейсі [13]	$D_4 = \int \exp \left(\frac{aS_m}{\bar{s}} \right) d\bar{e}$
5	Критерій Ойада [11]	$D_5 = \int \frac{\bar{S}_m}{\bar{s}} d\bar{e}$
6	Критерій Осакада [10]	$D_6 = \int \langle \bar{e} + aS_m - b \rangle d\bar{e} \quad \langle x \rangle = \begin{cases} x, & x \geq 0 \\ 0, & x < 0 \end{cases}$
7	Критерій Броззо [9]	$D_7 = \int \frac{2[S]}{3([S] - \bar{s})} d\bar{e}$

тут S_m – середнє значення напруження, МПа; \bar{S} – поточне значення напруження, МПа; $[S]$ – максимальне напруження руйнування, МПа; \bar{e} – поточне значення деформації, мм/мм; S_a, S_b – максимальне та мінімальне напруження руйнування (утворення мікротріщини).

Формулювання мети досліджень. Мета дослідження – проаналізувати адекватність використання різноманітних критеріїв руйнування в реологічних імітаційних САЕ-системах на прикладі Deform 3D (2D) та рекомендувати їх до призначення.

Викладення основного матеріалу дослідження. Щоб за допомогою МКЕ обчислити напружено-деформований стан заготовки під час різання, необхідно спочатку розбити це тіло на елементи і визначити відповідні константи матеріалу. Потім, поступово збільшуючи навантаження і задовольняючи заданим граничним умовам, можна провести рішення пружнопластичності. Для кожного кроку навантаження визначають різні параметри (переміщення, деформацію, напругу, енергію деформації тощо). Далі за допомогою цих параметрів обчислюється критерій руйнування різними способами.

Для аналізу ефективності використання того чи іншого критерію руйнування проведено порівняння результатів числового моделювання деформації і руйнування заготовки зі сталі 35, за динамічних навантажень, що виникають в процесі точіння заготовки за різних режимів різання. Числове моделювання деформації і руйнування матеріалів здійснювалося з використанням найхарактерніших для програмного продукту Deform 2D нормалізованих енергетичних та деформаційних критеріїв руйнування: Кокрофта–Лейтема, Райса–Трейсі і МакКлінтока.

Приведений порівняльний аналіз підсумкових картин руйнування гомогенного ізотропного матеріалу, яким є сталь 35, з використанням в різних комбінаціях глибини різання. Метою цього дослідження є аналіз впливу застосування різних механічних характеристик руйнування заготовки у критеріях міцності на результати числового моделювання деформації і руйнування методом зсуву за локального навантаження жорстким різальним клином. Як чисельний метод використовується метод кінцевих елементів, модифікований Г.Р. Джонсоном [6].

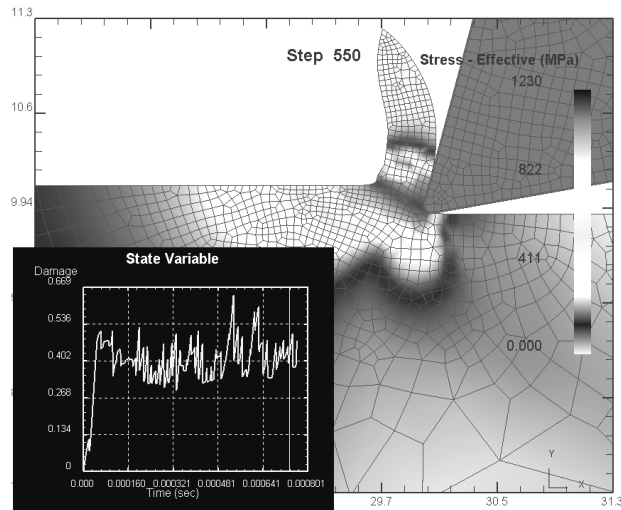


Рис. 1. Графічна інтерпретація динаміки зміни нормалізованого критерію руйнування Кокрофта–Лейтема (метод оброблення – точіння, матеріал деталі – сталь 35; режими різання $t=0,2$ мм, $S=0,25$ мм; $V=120$ м/хв)

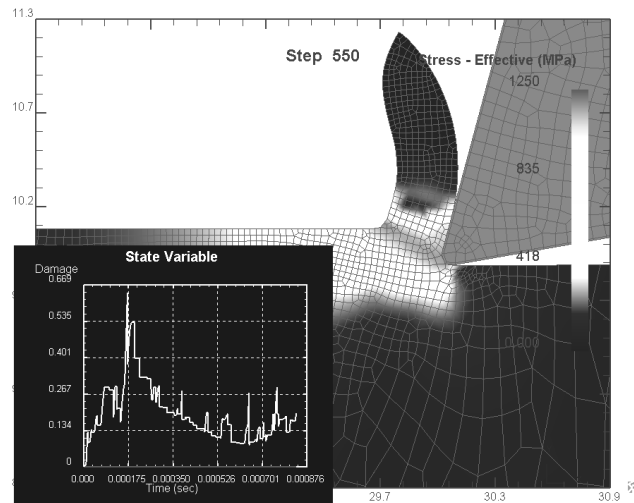


Рис. 2. Графічна інтерпретація динаміки зміни нормалізованого критерію руйнування Райса–Трейсі (метод оброблення – точіння, матеріал деталі – сталь 35; режими різання $t=0,2$ мм, $S=0,25$ мм; $V=120$ м/хв)

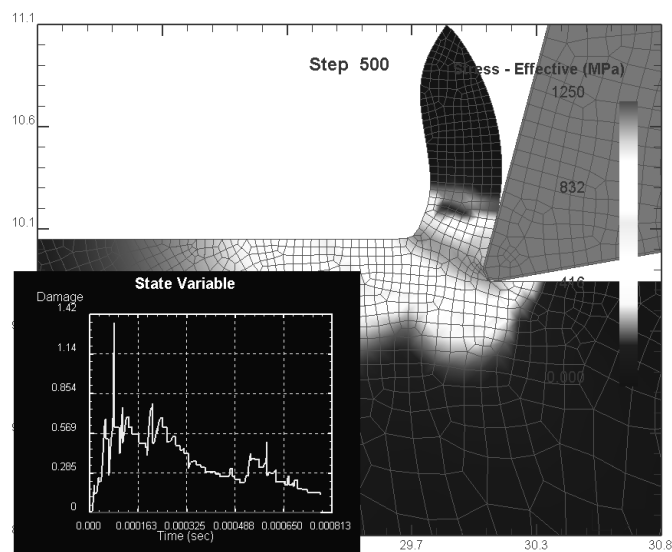


Рис. 3. Графічна інтерпретація динаміки зміни нормалізованого критерію руйнування МакКлінтока (метод оброблення – точіння, матеріал деталі – сталь 35; режими різання $t=0,2$ мм, $S=0,25$ мм; $V=120$ м/хв)

Висновки. Проаналізувавши результати імітаційного моделювання, можна зробити такі висновки:

– моделі різання з використанням деформаційних, силових та енергетичних критеріїв руйнування (методи МакКлінтока, Райса–Трейсі, Кокрофта–Лейтема) загалом адекватно описують реологічну картину стружкоутворення під час оброблення пластичних та квазікрихких матеріалів, адекватно реагують на зміну технологічних чинників (у цьому випадку збільшення глибини різання з $t=0,2$ мм до $t=1$ мм відбулося зменшення коефіцієнтів у 3–4 рази, що відповідає теоретичним розрахункам [5, 6, 8, 12]);

– під час використання деформаційних критеріїв руйнування (МакКлінтока) чітко спостерігаються етапи динаміки його зміни – зростання (зона I), релаксація (зона II), стабілізація (зона III) – (рис. 4), що цілком відповідає теоретичним положенням теорії динаміки дислокацій [2]. Це зумовлено початковим різким зростанням об'єму критично-деформованого матеріалу (через випередження величини швидкості деформацій $\dot{\epsilon}$ (strain rate)), подальшим його перерозподілом і усталеним перебігом процесу різання;

– під час використання енергетичних критеріїв (Кокрофта–Лейтема) різкого зростання критерію руйнування не спостерігається, що викликано врахуванням впливу температурних процесів, які частково нігілюють початковий спалах деформаційних явищ, особливо для пластичних матеріалів;

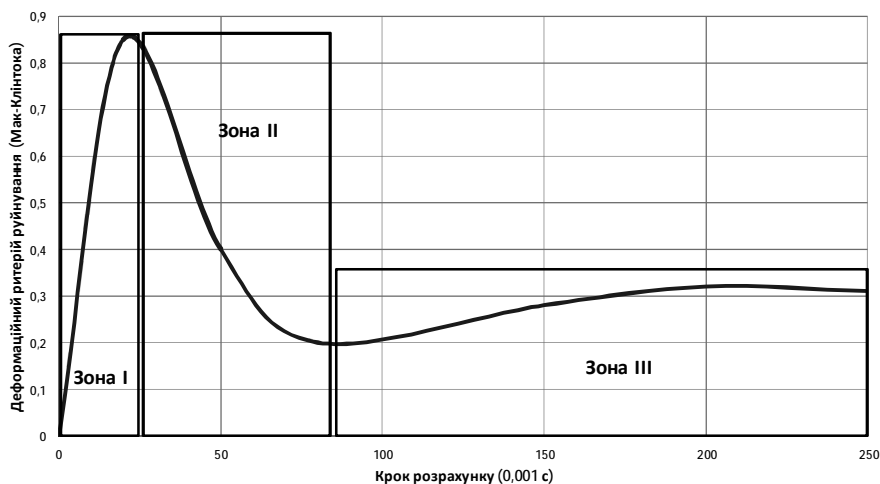


Рис. 4. Графічна інтерпретація динаміки зміни деформаційного критерію руйнування у реологічній моделі різання

– враховуючи вищенаведені висновки та зіставлення їх з теоретичними положеннями, можна рекомендувати для реологічних моделей різання пластичних матеріалів (сталі, дюралю міді, йомідновмісні сплави) використання енергетичних критеріїв руйнування, а для різання умовно-крихких матеріалів (чавуни, силуміни тощо) – деформаційних критеріїв (через домінуючий чинник впливу швидкості деформацій і значних дислокаційних трансформацій на появу та розвиток мікротріщин, що покладено в основу теорії крихкого руйнування).

1. Основи 3D-моделювання процесів механічної обробки методом скінченних елементів / Д.В. Криворучко, В.О. Залоза, В.Г. Корбач. – Суми: Вид-во СумДУ, 2009. –208 с. 2. МакКлінток Ф., Аргон А. Деформація и разрушение материалов. – М.: Мир, 1970. – 501 с. 3. Конева Н.А. Природа стадий пластической деформации // Соросовский образовательный журнал. – 1998. – №6. – С.99–105. 4. Ярославцев В.М. Механика процесса резания пластически деформированных металлов с неоднородными свойствами по толщине срезаемого слоя / Электронное научно-техническое издание МВТУ им. Баумана. – № 8, август 2011. – 19 с. 5. Швец С.В. Применение феноменологической теории деформируемости при исследовании процесса стружкообразования //

*Вісник СумДУ. – №3 (49). – 2003. – С.144–161. 6. Матвиенко Ю. Г. Модели и критерии механики разрушения // ФИЗМАТЛИТ. – 2006. – 328 с. 7. Freudenthal A.M. The inelastic behavior of engineering metals and structures. Wiley, New York, 1950, 160 p. 8. Cockroft, M.G. & Latham, D.J. (1968). Ductility and workability of metals, *L Inst. Metals.* – Vol. 96. – P. 33–39. 9. Brozzo, P., Deluca, B. and Rendina, R. (1972). A new method for the prediction of formability limits of metal sheets, *Proceedings of the 7th biennial congress of International Deep Drawing Research Group.* 10. Osakada, K., Watadaru, A. and Sekiguchi, H. (1977). Ductile fracture of carbon steel under cold metal forming conditions: Tension and torsion tests under pressure *Bulletin of TSME.* – Vol. 20. – P. 1557–1565. 11. Ayada, T., Higashino, & Mori, K. (1984). Central bursting in extrusion of inhomogeneous materials, *Proceedings of 1st ICTP. Advanced Technology of Plasticity.* – Vol. 1. – P 553–558. 12. McClintock, F.A. (1968). A criterion for ductile fracture by the growth of holes, *J. Appl. Mech.* – P. 363–371. 13. Rice, J. R. and Tracey, D.M. (1969). On the ductile enlargement of voids in triaxial stress fields, *T. Mech. Phys. Solids.* – Vol. 17. – P. 201–217. 14. Oyane, M. (1972). Criteria of ductile fracture strain, *Bulletin of fSMF.* – Vol. 15.*