

Карнаух С. Г.
Марков О. Є.

ДОСЛІДЖЕННЯ РОЗПОДІЛУ НАПРУЖЕНЬ У ЗОНІ ПЕРЕДРУЙНУВАННЯ ПРИ РЕАЛІЗАЦІЇ БЕЗВІДХОДНИХ ПРОЦЕСІВ РОЗДІЛЕННЯ СОРТОВОГО ПРОКАТУ НА МІРНІ ЗАГОТОВКИ

Метою роботи є дослідження процесу розділення сортового і трубного прокату з використанням відомих моделей розподілу напружень у зоні передруйнування та теоретичного моделювання процесу розділення з використанням методу скінченних елементів. На підставі аналізу відомих моделей виявлена модель, яка описує розподіл напружень в зоні передруйнування за допомогою двопараметричної нелінійної функції, що складається з двох частин: статичної, яка описує зміцнення матриці матеріалу, і експоненціальної, яка описує особливості накопичення пошкоджень у матеріалі з урахуванням виду напруженого стану та напруження. Застосування даної моделі дозволило отримати коректні результати напружень у зоні передруйнування для матеріалів у пластичному (Сталь 20), пружно-пластичному (Сталь 45, Сталь 40X) та крихкому (Сталь 60С2) станах, які підтверджуються результатами моделювання процесів розділення за схемою триточкової холодної ломки згином з використанням програмного комплексу Deform. Розбіжність величин напружень у зоні передруйнування, розрахованими за відомою моделлю і з використанням програмного комплексу Deform становить (10 ... 35)%. Значна розбіжність результатів пояснюється тим, що критерій Бріджмена малопридатний для зразків з гострими надрізами, що відповідає ефективному концентратору напружень при реалізації триточкової холодної ломки згином. При цьому максимальні значення похибок основних параметрів напружень при трьохосному, двоохосному та одноосному напруженні станах можуть складати до (60...70)%. Отримані результати можуть бути використані для автоматизації проектування процесів розділення сортового і трубного прокату на підставі накопичення даних та створення інформаційних банків із розрахунковими і методичними рекомендаціями, схемами деформування.

Ключові слова: ломка згином, крихкість, пластичність, накопичення пошкоджень, зона передруйнування, тріщина, міцність.

Отримання якісних заготовок є актуальним завданням бо навіть незначне підвищення ефективності технологій розділення призводить до суттєвого зменшення собівартості виготовлення продукції. Із багатьох способів розділення прокату на мірні заготовки найбільш перспективними є безвідходні способи розділення [1]. Ці способи є високопродуктивними та економічними. Саме цим пояснюється та увага, яку приділяють вчені та виробничники вдосконаленню безвідходних способів розділення. Завдяки їхнім зусиллям ці способи знайшли широке застосування у промисловості. При цьому вони мають обмеження, пов'язані з недостатньою вивченістю процесів розділення, факторів, які визначають закономірності розподілу напружень по перерізу прокату та причин дестабілізації траєкторії тріщини [2, 3].

Аналіз літературних даних [4] щодо результатів теоретичних і експериментальних досліджень процесів розділення сортового прокату на мірні заготовки показав, що навіть при загальному крихкому характері руйнування матеріалу, у вершині концентратора напружень присутні значні пластичні деформації, спостерігається локалізація деформації і полоси зсуву, витяжка берегів тріщин і в'язке їх підростання. По теперішній час відсутня єдина точка зору на критерії переходу від в'язкого руйнування до крихкого. Наявні результати досліджень не дозволяють повністю пояснити це явище.

У процесі розділення сортового прокату при різних температурно-силових впливах, як правило, спостерігаються незворотні зміни властивостей матеріалу та структури, що призводить до формування розсіяних ушкоджень у вигляді мікро- та макропор. При злитті останніх утворюється макротріщина, що поширюється на весь переріз зразка.

Описана у багатьох роботах [5–7] кінетика такого постадійного процесу складна і неоднозначна. Суперечливим є підхід до оцінки розмірів зон пластичності та передруйнування, а також характеру розподілу в них напружень для крихких та пластичних матеріалів. Запропоновані моделі зони передруйнування для квазіхрупких твердих тіл (Баренблаттом [8]) та ідеально пластичних матеріалів (Панасюком-Дагдейлом [9]).

Однак, з використанням відомих моделей неможливо описати такі явища, як зародження, зростання і злиття пор, які передують розвитку пластичного руйнування, а також складно передбачити ефекти перенапруження поблизу вершини тріщини.

Мета роботи – дослідження процесу розділення сортового і трубного прокату з використанням відомих моделей розподілу напружень у зоні передруйнування та теоретичного моделювання процесу розділення з використанням методу скінченних елементів.

Однією з моделей розподілу напружень у зоні передруйнування є модель, що запропонована Волковим [10]. Сутність її полягає у тому, що характер розподілу напружень поблизу вершини тріщини повторює спадну ділянку кривої на повній діаграмі деформування матеріалу, отриманої під час випробування гладкого зразка за умов гранично жорсткого навантаження.

У роботі [11] розроблено та експериментально обґрунтовано модель накопичення пошкоджень у матеріалах, в якій для обліку особливостей еволюції структури матеріалу, у зв'язку з впливом виду напруженого стану, введено функцію:

$$f(\sigma_{ij}) = B^{3 \cdot K_\sigma - 1}, \quad (1)$$

де B – характеристика чутливості матеріалу до виду напруженого стану щодо накопичення ушкоджень;

K_σ – параметр Бріджмена. $K_\sigma = \sigma_{cp} / \sigma_i$,

де $\sigma_{cp} = (\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3) / 3$ – середнє напруження;

$\sigma_i = 1 / \sqrt{2} \sqrt{(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2}$ – інтенсивність напружень.

По мірі вичерпання ресурсу пластичності в процесі напрацювання відбувається зростання коефіцієнта B , що характеризує чутливість матеріалу до виду напруженого стану, відносно накопичення ушкоджень. Встановлено, що вид напруженого стану, в першу чергу, впливає на зміну параметрів, що характеризують зону і рівень пошкодженості матеріалу в граничному стані, зокрема зменшується ширина зони процесу, в якій відбувається безпосереднє злиття пор і мікротріщин, їх трансформація в макротріщину, змінюється тип ушкоджень. При цьому зі збільшенням жорсткості напруженого стану нахил лінійної ділянки КС, що відповідає утворенню та зростанню тріщини в матеріалі (рис. 1), а отже, і енергоємність руйнування зменшуються.

Зменшується параметр Δl_p (див. рис. 1), якому можна поставити у відповідність максимальне розкриття тріщини в її центральній частині. Це свідчить про стійку тенденцію до зниження пластичності матеріалу зі збільшенням жорсткості напруженого стану.

Аналіз відомих даних показує, що параметр Δl_p пропорційний приросту площі тріщини, що утворилася і знаходиться в залежності з параметром Δ , що характеризує ділянку біля вершини тріщини, на якій досягаються найбільші напруження та максимальна інтенсивність пошкоджень (рис. 2).

У роботі [11] для опису розподілу напружень в зоні передруйнування прийнята двопараметрична нелінійна функція, що складається з двох частин: статичної, яка описує зміцнення матриці матеріалу, і експоненціальної, яка описує особливості накопичення пошкоджень у матеріалі з урахуванням виду напруженого стану та напрацювання:

$$\sigma = \sigma_{0,2} (x/R)^n \cdot (1/B)^{(3 \cdot K_\sigma - 1) / (1 - x/R)}, \quad (2)$$

де $\sigma_{0,2}$ – межа текучості матеріалу;

x – поточна відстань від вершини тріщини до розглянутої точки в пластичній зоні;

R – протяжність пластичної зони;

n – коефіцієнт деформаційного зміцнення.

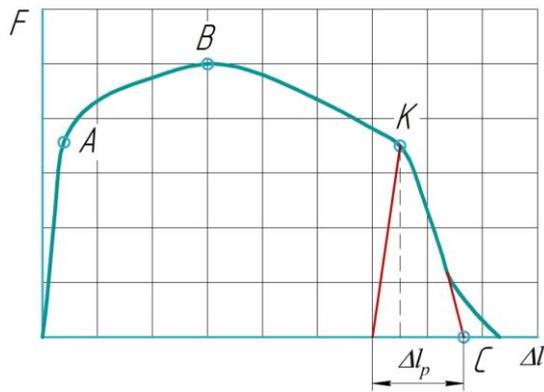


Рис. 1. Повна діаграма деформування пластичного матеріалу

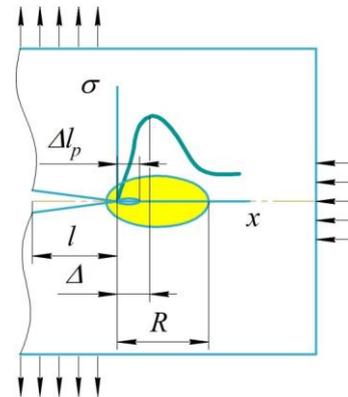


Рис. 2. Схема руйнування пластичного матеріалу

Результати моделювання розподілу напружень у зоні передруйнування матеріалу з використанням функції (2) для матеріалів у пластичному (Сталь 20), пружно-пластичному (Сталь 45, Сталь 40X) та крихкому (Сталь 60С2) станах, при різних значеннях n , B , k_σ представлені на рис. 3. Запропонована модель (2) добре описує закон розподілу напружень у зоні передруйнування для матеріалів, що знаходяться у пластичному і пружно-пластичному станах, і у меншому ступені – для крихких матеріалів.

Для перевірки результатів теоретичних розрахунків проведено моделювання процесів розділення за схемою триточкової холодної ломки згином з використанням програмного комплексу Deform методом скінченних елементів.

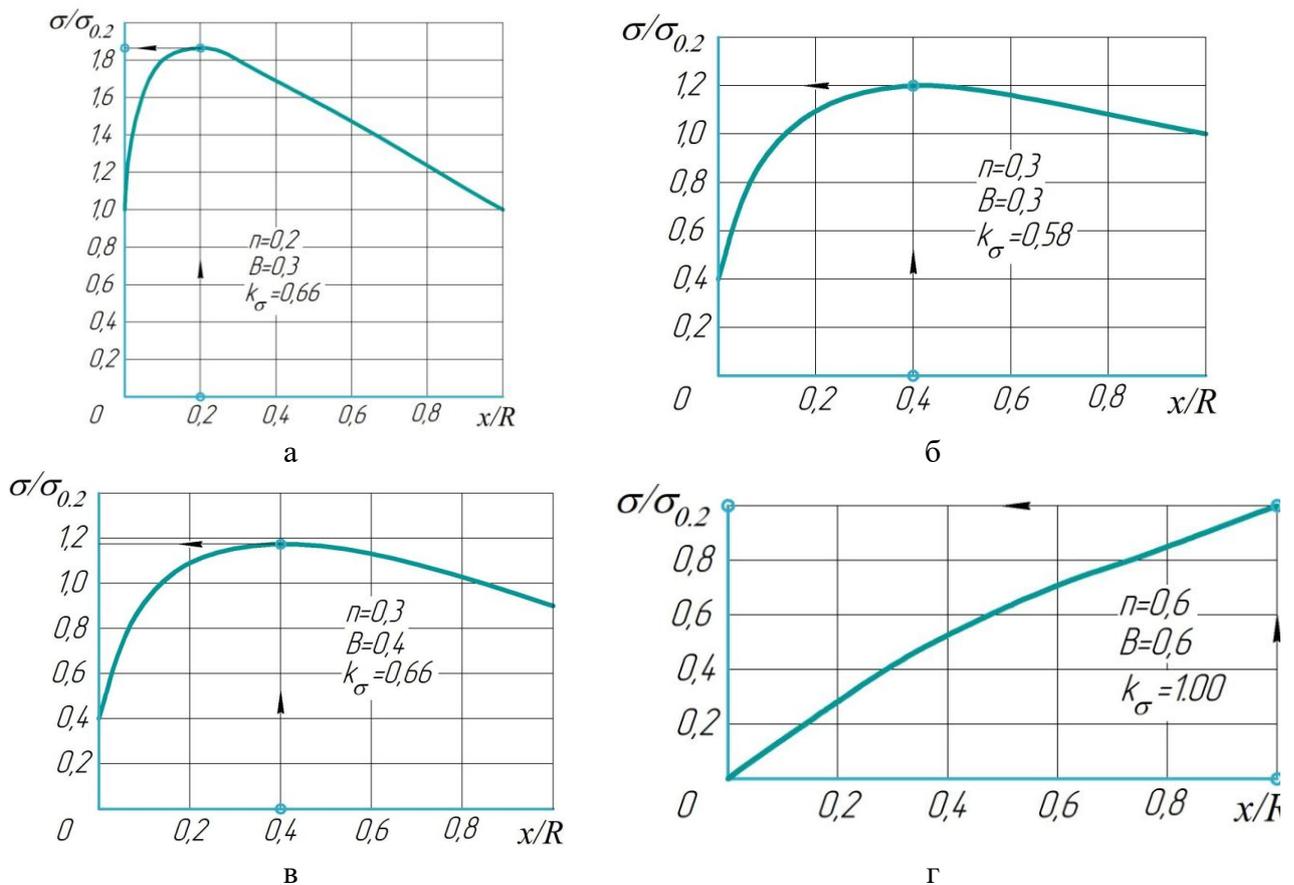


Рис. 3. Результати моделювання розподілу напружень у зоні передруйнування для матеріалів у пластичному (а – Сталь 20), пружно-пластичному (б – Сталь 45, в – Сталь 40X) та крихкому (г – Сталь 60С2) станах.

Параметри процесу моделювання та матеріали зразків представлені у табл. 1, табл. 2.

Таблиця 1

Параметри процесу моделювання

Назва параметру	Значення параметру		
	статичне навантаження	динамічне навантаження	статико-динамічне навантаження
1 Властивості матеріалу зразка	пружно-пластичний		
2 Температура	20°C		
3 Кількість елементів розбиття	32000		
4 Коефіцієнт тертя по закону Зібеля	0,12		
5 Параметри розрахунку:	аналіз Лагранжа		
○ кількість кроків розрахунку	100	100	100+100
○ приріст кроків, мм/крок	0,30	0,30	0,05+0,25
○ хід ломника, мм	30	30	5+25
6 Рух ломника	переміщення прямолінійне		
○ швидкість, мм/с	1	12000	1+12000

Таблиця 2

Матеріали зразків для моделювання

Марка сталі	Сталь 20	Сталь 45	Сталь 40X	Сталь 60C2
Матеріал із бази Deform	<i>AISI - 1020</i>	<i>AISI - 1045</i>	<i>AISI - 5135H</i>	<i>AISI - 1060</i>

При моделюванні використовували зразки з розмірами: діаметром 16 мм; довжиною 70 мм. Параметри концентратора напружень у формі кільцевої канавки трикутного профілю: глибина $\Delta H = 1,5$ мм; радіус при вершині $\Delta r = 0,15$ мм. Схема навантаження – триточкова холодна ломка згином. Навантаження прикладали посередині між опорами. Відстань між опорами – 60 мм. Зразки виготовлені з сортового прокату із різних марок сталей, що знаходяться у пластичному – Сталь 20, пружно-пластичному – Сталь 45, Сталь 40X та крихкому станах – Сталь 60C2 (див. табл. 2.).

Для даної задачі у програмі Deform обрано вирішувач «Розріджених матриць» та ітераційний метод – Ньютона-Рафсона, тип розрахунку – Normalized C&L. Результати моделювання представлені на рис. 4.

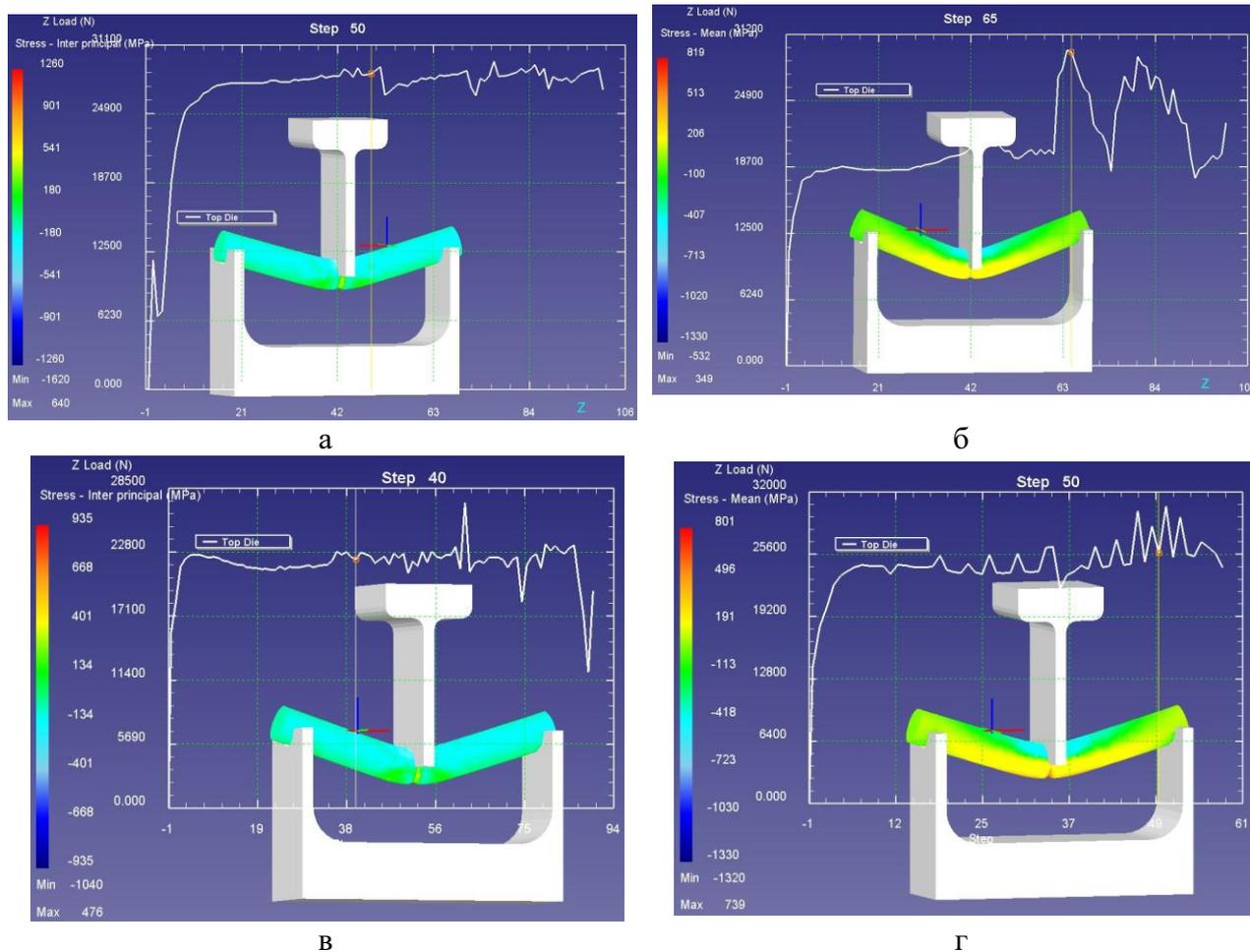


Рис. 4. Результати моделювання для матеріалів:
 а – Сталь 20, б – Сталь 45, в – Сталь 40X, г – Сталь 60C2

Порівняння результатів розрахунків з використанням моделі (див. формула 2) та програмного комплексу Deform представлено у табл. 3.

Таблиця 3

Результати розрахунків напружень у зоні передруйнування

Матеріал	$\sigma_{0.2}, \text{МПа}$	n	B	K_{σ}	Робочі напруження, МПа:		$\sigma/\sigma_{0.2}$	σ^*/σ
					σ за формулою (2)	σ^* з використанням Deform		
Сталь 20	250	0,2	0,3	0,66	472	640	1,89	1,36
Сталь 45	324	0,3	0,3	0,58	390	349	1,20	0,89
Сталь 40X	360	0,3	0,4	0,66	430	476	1,19	1,11
Сталь 60C2	1175	0,6	0,6	1,00	1130	739	0,96	0,65

На підставі аналізу табл. 3 можна зробити висновки про те, що розбіжність величин напружень у зоні передруйнування, розрахованих за формулою (2) і з використанням програмного комплексу Deform становить (10 ... 35)%. Результат задовільний. Значна розбіжність результатів пояснюється тим, що критерій Бріджмена заснований на допущенні про сталість осевої деформації у межах зони, яка ослаблена надрізом. Але він мало придатний для зразків з гострими надрізами, що відповідає ефективному концентратору напружень при реалізації

третичкової холодної ломки згином. При цьому треба мати на увазі, що максимальні значення похибок основних параметрів напружень при трьохосному, двохосному та одноосному напружених станах можуть складати до (60...70)%.

ВИСНОВКИ

1. Використання запропонованої моделі, яка описує особливості накопичення пошкоджень у матеріалі з урахуванням виду напруженого стану та напрацювання, дозволяє отримати коректні результати напружень у зоні переддруйнування для матеріалів у пластичному (Сталь 20), пружно-пластичному (Сталь 45, Сталь 40X) та крихкому (Сталь 60С2) станах. Отримані результати підтверджуються результатами моделювання процесів розділення за схемою третичкової холодної ломки згином з використанням програмного комплексу Deform. Розбіжність величин напружень у зоні переддруйнування, розрахованих за відомою моделлю і з використанням програмного комплексу Deform становить (10 ... 35)%. Значна розбіжність результатів пояснюється тим, що критерій Бріджмена малоприматний для зразків з гострими надрізами, що відповідає ефективному концентратору напружень при реалізації третичкової холодної ломки згином. При цьому максимальні значення похибок основних параметрів напружень при трьохосному, двохосному та одноосному напружених станах можуть складати до (60...70)%.

2. Отримані результати можуть бути використані для автоматизації проектування процесів розділення сортового і трубного прокату на підставі накопичення даних та створення інформаційних банків із розрахунковими і методичними рекомендаціями, схемами деформування.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Карнаух С. Г. Совершенствование безотходных способов разделения сортового проката и оборудования для получения заготовок высокого качества : монография. Краматорск: ДГМА. 2010. 196 с., [ISBN 978-966-379-463-1](#).
2. Karnaukh S. G., Markov O. E., Aliieva L. I., Kukhar V. V. Designing and researching of the equipment for cutting by breaking of rolled stock. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2020. 109. 9–12, pp. 2457–2464, <https://doi.org/10.1007/s00170-020-05824-7>.
3. Чаусов М. Г., Марущак П. О., Пилипенко А. П., Хабурський Я. М. Вплив динамічних незрівноважених процесів на механічні властивості та корозійну тривкість титанового сплаву. *Фізико-хімічна механіка матеріалів*. 2017. 53, 6. С. 23–29.
4. Karnaukh S. G., Markov O. E., Kukhar V. V., Shapoval K. V. Research of the rolled stock separating into workpieces using breaking by bending with dynamic and static-dynamic force. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2022. 120, pp. 2763–2776, <https://doi.org/10.1007/s00170-022-08902-0>.
5. Rice J. R., Tracey D. M. On the ductile enlargement of voids in triaxial stress fields. *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*. 1969. 17(3). pp. 201–207.
6. Worswick M. J., Pick R. J. Void growth and constitutive softening in a periodically voided solid. *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*. 1990. 38(5). pp. 601–625.
7. Besson J., Steglich D., Brooks W. Modeling of crack growth in round bars and plane strain specimen. *International Journal of Solids and Structures*. 2001. 38(46-47). pp. 8259–8284.
8. Баренблатт Г. И. Математическая теория равновесных трещин, образующихся при хрупком разрушении. *Журнал прикладной механики и технической физики*. 1961. 4. С. 3–57.
9. Леонов М. Я., Панасюк В. В. Развитие найдрібніших тріщин у твердому тілі. *Прикладна механіка*. 1959. 5. 4. С. 391–401.
10. Волков С. Д., Дубровина Г. И., Соковнин Ю. П. О краевой задаче механики разрушения. *Проблемы прочности*. 1978. 1. С. 3–7.
11. Чаусов Н. Г., Богданович А. З. Моделирование кинетики деформирования материала в зоне предразрушения. *Проблемы прочности*. 2003. 2. С. 54–65.

REFERENCES

1. Karnaukh S. G. Improvement of waste-free methods of separating rolled products and equipment for producing high-quality blanks: monograph. Kratomorsk: DSMA. 2010. 196 p., [ISBN 978-966-379-463-1](#) (in Russian).
2. Karnaukh S. G., Markov O. E., Aliieva L. I., Kukhar V. V. Designing and researching the equipment for cutting by breaking of rolled stock. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2020. 109. 9–12, pp. 2457–2464, <https://doi.org/10.1007/s00170-020-05824-7>.

3. Chausov M. G., Marushchak P. O., Pylypenko A. P., Khabursky Ya. M. Influence of dynamic non-equilibrium processes on the mechanical properties and corrosion resistance of titanium alloy. *Physical and chemical mechanics of materials*. 2017. 53, 6. pp. 23–29 (in Ukrainian).
4. Karnaukh S. G., Markov O. E., Kukhar V. V., Shapoval K. V. Research of the rolled stock separating into workpieces using breaking by bending with dynamic and static-dynamic force. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2022. 120, pp. 2763–2776, <https://doi.org/10.1007/s00170-022-08902-0>.
5. Rice J. R., Tracey D. M. On the ductile enlargement of voids in triaxial stress fields. *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*. 1969. 17(3). pp. 201–207.
6. Worswick M. J., Pick R. J. Void growth and constitutive softening in a periodically voided solid. *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*. 1990. 38(5). pp. 601–625.
7. Besson J., Steglich D., Brooks W. Modeling of crack growth in round bars and plane strain specimen. *International Journal of Solids and Structures*. 2001. 38(46-47). pp. 8259–8284.
8. Barenblatt G. I. Mathematical theory of equilibrium cracks formed during brittle fracture. *Journal of Applied Mechanics and Technical Physics*. 1961. 4. pp. 3–57 (in Russian).
9. Leonov M. Ya., Panasyuk V. V. Development of the most significant cracks in a solid. *Applied Mechanics*. 1959. 5. 4. pp. 391–401 (in Russian).
10. Volkov S. D., Dubrovina G. I., Sokovnin Yu. P. On the boundary value problem of fracture mechanics. *Problems of Strength*. 1978. 1. pp. 3–7 (in Russian).
11. Chausov N. G., Bogdanovich A. Z. Modeling the kinetics of material deformation in the pre-fracture zone. *Problems of Strength*. 2003. 2. pp. 54–65 (in Russian).

Karnaukh S. Investigation of stress distribution in the pre-fracture zone during the implementation of waste-free processes for the separation of sectional rolled products into workpieces.

The objective of the work is to investigate the process of separating sectional and tubular rolled products using known models of stress distribution in the pre-fracture zone and theoretical modeling of the separation process using the finite element method. Based on the analysis of known models, a model has been identified that describes the stress distribution in the pre-fracture zone using a two-parameter nonlinear function consisting of two parts: a power-law part, which describes the strengthening of the material matrix, and an exponential part, which describes the peculiarities of damage accumulation in the material, taking into account the type of stress state and work hardening. The application of this model has made it possible to obtain correct results for stresses in the pre-fracture zone for materials in the plastic (Steel 20), elastic-plastic (Steel 45, Steel 40Kh), and brittle (Steel 60S2) states, which are confirmed by the results of modeling the separation processes using the three-point cold bending fracture scheme with the Deform software package. The discrepancy between the calculated stress values in the pre-fracture zone, obtained using the known model and the Deform software package, ranges up to (10...35)%. The significant discrepancy in the results is explained by the fact that the Bridgman criterion is poorly applicable to samples with sharp notches, which corresponds to an effective stress concentrator during the implementation of the three-point cold bending fracture, and the maximum errors in the main stress parameters under triaxial, biaxial, and uniaxial stress states can reach up to (60...70)%. The obtained results can be used for the automation of designing processes for separating sectional and tubular rolled products based on data accumulation and the creation of informational databases with calculation and methodological recommendations, as well as deformation schemes.

Keywords: bending fracture, brittleness, plasticity, damage accumulation, pre-fracture zone, crack, strength.

Карнаух Сергій Григорович – канд. техн. наук, доцент ДДМА

Karnaukh Sergii – Candidate of Technical Science, Associate Professor DSEA

E-mail: karnaukh.sergii@gmail.com

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2878-4065>.

Марков Олег Євгенійович – д-р техн. наук, зав. каф. АВП, ДДМА

Markov Oleg – Doctor of Technical Sciences, Full Professor, Head of Department DSEA

E-mail: oleg.markov.ond@gmail.com

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9377-9866>

ДДМА – Донбаська державна машинобудівна академія, м. Краматорськ-Тернопіль.

DSEA – Donbass State Engineering Academy, Kramatorsk-Ternopil.