

УДК 621.787.2

Грушко О. В.  
Слободянюк Ю. О.  
Ткаченко Р. С.

### КРИВІ ТЕЧІЇ КАТАНКИ МАРОК G3Si1 ТА Св-08Г2С

На сьогоднішній день споживання зварювального дроту суцільного перерізу при виготовленні сталевих конструкцій залишається досить високим і має тенденцію до зростання, тому виробництво обмідненого дроту є і буде залишатися перспективним. Сучасна технологія виробництва маловуглецевого дроту (типу Св-08Г2С та G3Si1) передбачає його виготовлення діаметром 0,8–1,2 мм із катанки діаметром 5,5 мм без застосування операцій проміжного відпалу. Вимоги до хімічного складу катанки марки Св-08Г2С регламентується згідно ГОСТ 2246-70, а G3Si1 – згідно ISO 14341:2009 та наведено у табл. 1. Зауважимо, що аналогом за хімічним складом G3Si1 є марка Св-08ГС, яка регламентується радянським ГОСТ 2246-70. У Західній Європі не використовується матеріал Св-08Г2С, а тільки катанка G4Si1, хімічний склад якої регламентується згідно ISO 14341:2009 та є аналогом радянській Св-08Г2С.

При виборі катанки для виробництва дроту виробники мають орієнтуватися на технологічні можливості її переробки в процесі волочіння. Очевидно, що технологічні можливості безпосередньо пов'язані із механічними характеристиками матеріалу – його пластичністю, міцністю, твердістю та ін. Однією з важливих характеристик матеріалу в пластичній області є крива течії (зміцнення), яка є фундаментальною технологічною функцією і входить в карту матеріалу [1]. Розрахунок енергосилових характеристик, дослідження механіки процесу волочіння, моделювання МКЕ вимагає достовірних і надійних даних щодо кривих течії матеріалів, які оброблюються. Зауважимо, що у відомих довідниках відсутні вищезазначені дані для катанок та маловуглецевих зварювальних дротів таких марок як G3Si1 та Св-08Г2С [2–4].

Метою роботи є побудова кривих течії катанки марок G3Si1 і Св-08Г2С різних партій та виробників в стані постачання та після відпалу.

В основному для побудови кривих течії використовують такі методи випробувань як розтяг, стиск або кручення [2–4]. Характер кривих течій не залежить від виду деформацій, яким вони отримані, побудова їх може здійснюватися на основі найпростіших випробувань, а результати можуть бути використані при аналізі найскладніших процесів. Для побудови кривих течій зварювальної катанки найзручніше використовувати такий метод випробувань як розтяг. Методи випробувань на стиск або кручення використовувати незручно через малий діаметр вихідної катанки, що вимагає використання нестандартних зразків відповідного розміру та випробувального обладнання.

Проведення випробувань на розтяг проводилось згідно ISO 6892-1 «Металеві матеріали – випробування на розтяг при кімнатній температурі» на розривній машині Р5М, яка має свідоцтво про метрологічну повірку. Використовувались зразки катанки з робочою довжиною 200мм та діаметром 5,5мм в стані поставки та зразки відпаленого дроту діаметром 4,75мм в стані проміжного відпалу.

Для дослідження було використано по 5 зразків кожної марки матеріалу різних партій та різних постачальників. Хімічний склад основних елементів кожного зразка проводився за допомогою спектрометра SpectroMAxx, що пройшов метрологічну повірку. Результати вимірювань хімічного складу матеріалів наведено в табл. 1.

У табл. 2 та табл. 3 наведено стандартні механічні властивості матеріалів G3Si1 та Св-08Г2С:  $\sigma_{sp}$  – границя міцності, МПа;  $\sigma_T$  – границя текучості, МПа;  $\Delta l$  – відносне видовження, %;  $\psi$ , – відносне звуження, %; а також виробники даних партій катанки та умови виробництва з неї обмідненого дроту.

Таблиця 1

## Хімічний склад матеріалу

Марка матеріалу	№ зразка	Масова частка основних елементів, %							
		C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Cu
G3Si1	Вимоги	0,06–0,14	0,7–1,0	1,3–1,6	≤0,025	≤0,025	≤0,15	≤0,15	≤0,20
	1	0,083	0,814	1,58	0,014	0,0115	0,036	0,019	0,035
	2	0,102	0,74	1,54	0,022	0,014	0,026	0,025	0,041
	6								
	3	0,109	0,701	1,6	0,019	0,0125	0,021	0,016	0,032
	7								
	4	0,105	0,753	1,60	0,021	0,0058	0,024	0,031	0,062
	5	0,121	0,721	1,587	0,021	0,0065	0,039	0,033	0,053
Св-08Г2С	Вимоги	0,05–0,11	0,7–0,95	1,8–2,1	≤0,030	≤0,025	≤0,20	≤0,25	≤0,20
	1	0,101	0,731	1,938	0,023	0,014	0,021	0,009	0,019
	6								
	7								
	8								
	2	0,103	0,726	2,05	0,023	0,009	0,024	0,014	0,02
	3	0,089	0,702	1,932	0,02	0,0142	0,025	0,017	0,03
	4	0,078	0,746	1,81	0,012	0,0075	0,034	0,073	0,152
5	0,072	0,702	1,892	0,012	0,0076	0,045	0,06	0,133	

Таблиця 2

## Механічні властивості катанки G3Si1

№ зразка	Механічні властивості				№ плавки	Виробник	Примітка
	$\sigma_{вр}$ , МПа	$\sigma_T$ , МПа	$\Delta l$ , %	$\psi$ , %			
1	529	350	33	72	352092	Метінвест	Без відпалу було виготовлено дріт діаметром 1,2 мм
2	538	359	28	63	260399	Арселор Міттал	В процесі волочіння спостерігались обриви дроту
6	442	282	30	71			Зразок відпаленого дроту
3	553	392	30	65	260401		В процесі волочіння спостерігались обриви дроту
7	421	283	31,5	73			Зразок відпаленого дроту
4	571	430	25	74	240086	Метінвест	Без відпалу було виготовлено дріт діаметром 1,0–1,2 мм
5	559	413	27,5	72	240085		

Технологічний процес виробництва обмідненого дроту складається із двох етапів:

- попереднього волочіння, яке включає в себе проходження катанки діаметром 5,5 мм через роликовий окалиноломач та 7 блоків сухого волочіння з отриманням проміжного діаметру 2,0 або 2,5 мм;

- фінішного волочіння дроту, яке включає в себе 8 блоків сухого волочіння, ванн промивки, травлення, обміднення, знову ванн промивки, а також 9 блоку мокрого волочіння з отриманням кінцевого діаметру 0,8–1,2 мм.

Для побудови кривих течій використовували діаграми розтягу, які обробляли за методикою згідно роботи [5]:

Таблиця 3

## Механічні властивості катанки Св-08Г2С

№ зразка	Механічні властивості				№ пла- вки	Виробник	Примітка
	$\sigma_{вр}$ , МПа	$\sigma_T$ , МПа	$\Delta l$ , %	$\psi$ , %			
1	554	399	20,5	45	252031	Арселор Міттал	В процесі волочіння спосте- рігались обриви дроту
6	455	302	32	73			Зразки відпаленого дроту
7	452	309	28,5	72			
8	452	311	31,5	72			
2	503	425	33	76	343772	Метінвест	Без відпалу було виготовле- но дріт діаметром 1,2 мм
3	631	453	25	60	260585	Арселор Міттал	В процесі волочіння спосте- рігались обриви дроту
4	450	303	32	72	20120	ООО «НЛМК Метиз» Росія	Було виготовлено дріт діа- метром 1,0–0,8 мм без опе- рації проміжного відпалу
5	439	301	30	60	26309	НСММЗ Росія	Без відпалу було виготовле- но дріт діаметром 1 мм

$$\sigma_i = \frac{P}{F_0} \frac{l_0 + \Delta l_{зал}}{l_0}, \quad e_i = \ln \frac{l_0 + \Delta l_{зал}}{l_0} \quad (1)$$

де  $\sigma_i$  – інтенсивність нормальних напружень, МПа;  $e_i$  – інтенсивність деформацій;  $P$  – розтягувальна сила;  $F_0$  – початкова площа поперечного перерізу зразка;  $l_0$  – робоча довжина зразка,  $\Delta l_{зал}$  – залишкова деформація

Побудову кривих течій для катанки G3Si1 та Св-08Г2С було здійснено за допомогою степеневої функції П. Людвіга [6]:

$$\sigma_i = A e_i^n, \quad (2)$$

де  $n$  – показник деформаційного зміцнення;  $A$  – модуль (коефіцієнт) зміцнення. Графіки функцій представлено на рис. 1 та значення коефіцієнтів апроксимації, а також скорегованого коефіцієнта детермінації  $R_{adj}^2$  наведено в табл. 4 та 5.

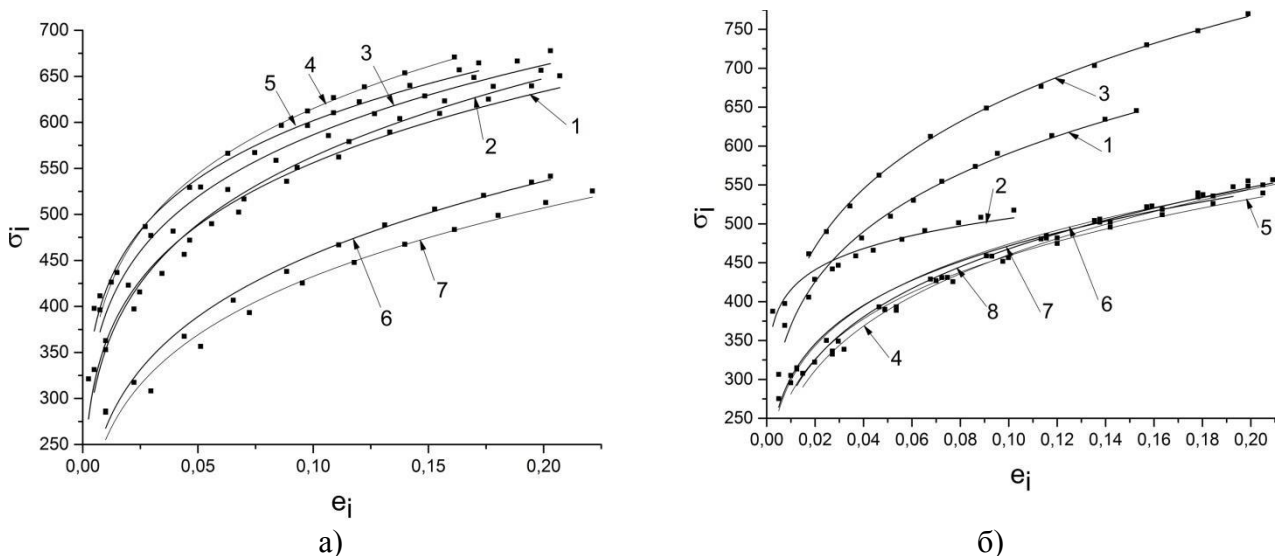


Рис. 1. Криві течій апроксимовані за (2) показані суцільною лінією ( $\sigma_i$  вимірюється в МПа): а) G3Si1; б) Св-08Г2С (позначення в таблиці 4 та 5)

На рис. 2 наведено графіки апроксимації Г. Свіфта, яка містить деформаційний параметр – зміщення графіка вліво по осі абсцис вліво на величину  $e_0$  [7]:

$$\sigma_i = A_2 (e_0 + e_i)^{n_2}, \quad (3)$$

На рис.3 представлено криві течії побудовані за допомогою трьохпараметричної функції, яка запропонована П. Людвигом [6]:

$$\sigma_i = B + A_1 e_i^{n_1}, \quad (4)$$

де  $B$  – параметр, фізичне значення якого відповідає границі текучості. Значення коефіцієнтів апроксимації та скорегованого коефіцієнта детермінації  $R_{adj}^2$  наведено в табл. 4 та табл. 5.

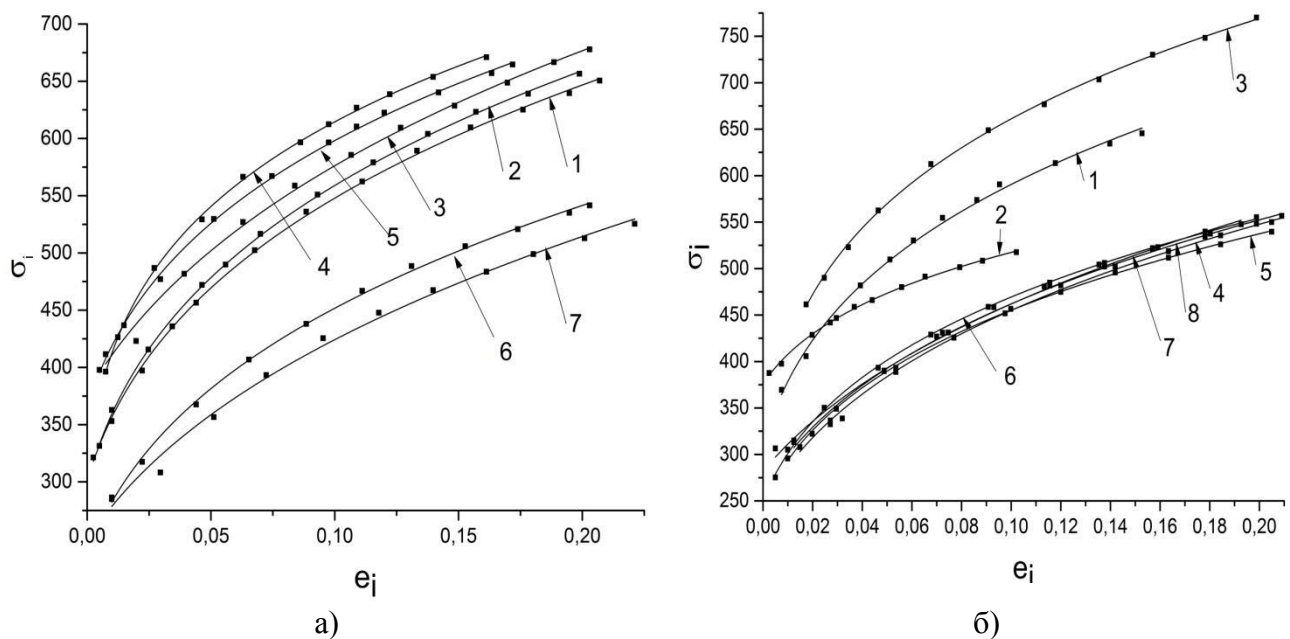


Рис. 2. Криві течії апроксимовані за (3) показані суцільною лінією ( $\sigma_i$  вимірюється в МПа): а) G3Si1; б) Св-08Г2С (позначення в табл. 4 та 5)

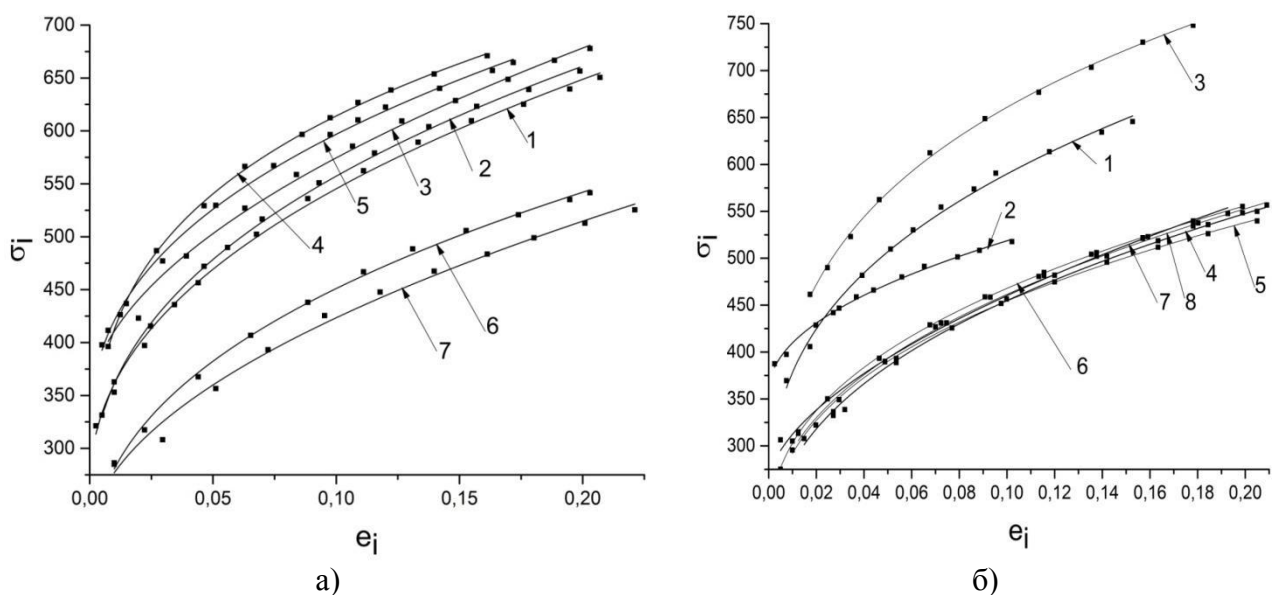


Рис.3. Криві течії апроксимовані за (4) показані суцільною лінією ( $\sigma_i$  вимірюється в МПа): а) G3Si1; б) Св-08Г2С (позначення в табл. 4 та 5)

Таблиця 4

Значення коефіцієнтів апроксимації для матеріалу G3Si1

№ зразка/ № кри- вої	Функція (3)			Функція (4)				Функція (5)			
	A, МПа	$n$	$R_{adj}^2$	$A_2$ , МПа	$e_0$	$n_2$	$R_{adj}^2$	B, МПа	$A_1$ , МПа	$n_1$	$R_{adj}^2$
1	858 ±23	0,188 ±0,011	0,974	967 ±9	-0,011 ±0,001	0,258 ±0,006	0,999	257 ±14	798 ±21	0,442 ±0,03	0,997
2	897± 17	0,202± 0,007	0,988	981± 9	-0,009 ±0,001	0,254 ±0,005	0,999	232 ±12	817± 10	0,399± 0,02	0,999
3	878± 25	0,175± 0,012	0,964	1021 ±32	-0,028 ±0,008	0,279 ±0,024	0,995	343 ±21	792 ±46	0,535± 0,065	0,993
4	924± 7	0,177± 0,003	0,998	953 ±8	-0,003 ±0,0008	0,193± 0,004	0,999	163 ±30	816± 16	0,257± 0,021	0,999
5	869± 17	0,159± 0,007	0,983	963 ±11	-0,012 ±0,002	0,217± 0,007	0,999	306 ±17	736± 18	0,403± 0,035	0,998
6	778± 13	0,231± 0,007	0,992	840± 13	-0,011 ±0,002	0,283± 0,01	0,999	170 ±20	713 ±12	0,405± 0,036	0,998
7	733± 23	0,229± 0,014	0,972	838± 34	-0,023 ±0,009	0,326± 0,032	0,993	214± 26	696± 42	0,523± 0,078	0,99

Для порівняльного аналізу побудови кривих течій було взято два зразки після відпалу різних поставок для матеріалу G3Si1 (плавки 260399 та 260401). Коефіцієнт зміцнення  $n$  отриманий в результаті апроксимації за П. Людвігом (3) до відпалу для плавки 260399 становив 0,202 та для плавки 260401 – 0,175, а після відпалу  $n$  дорівнював 0,231 та 0,229 відповідно. Значення коефіцієнта  $A$  після відпалу стали нижчі: до відпалу для плавки 260399  $A = 897$  МПа та для плавки 260401  $A = 878$  МПа, після відпалу значення  $A$  стало 778 МПа та 733 МПа відповідно. Тобто для суттєвої стабілізації механічних властивостей необхідно застосувати проміжні операції термообробки дроту, зокрема відпал.

Для порівняльного аналізу матеріалу Св-08Г2С було взято одну поставку (плавка 252031): один зразок до відпалу (зразок №1) та три зразки після відпалу (№№6-8). Значення коефіцієнтів  $A$  і  $n$  згідно функції (3) становило 944 МПа та 0,204 та після відпалу  $A$  і  $n$  дорівнюють 753 МПа і 0,201; 736 МПа і 0,193 та 787 МПа і 0,226 відповідно. Дані значення свідчать про зменшення коефіцієнта  $A$ , а зміна коефіцієнта  $n$  має неоднозначний характер (дослідження проводились на прикладі одного мотка катанки).

Значення коефіцієнта детермінації, які наведені в таблицях 4 та 5 для кожної апроксимувальної функції (3) менше, ніж для функцій (4) та (5). Апроксимацію П. Людвіга (3) краще використовувати для аналітичних розрахунків, а апроксимації Г.Свіфта (4) та трьохпараметричну функцію П. Людвіга (5) для моделювання. Адже чим ближче значення скорегованого коефіцієнта детермінації до 1, тим точніше описані експериментальні дані.

Таблиця 5

Значення коефіцієнтів апроксимації для матеріалу Св-08Г2С

№ зразка/ № кривої	Функція (3)			Функція (4)				Функція (5)			
	A, МПа	n	$R_{adj}^2$	$A_2$ , МПа	$e_0$	$n_2$	$R_{adj}^2$	B, МПа	$A_1$ , МПа	$n_1$	$R_{adj}^2$
1	944±18	0,204±0,007	0,989	1020±25	-0,008±0,002	0,245±0,013	0,996	214±39	861±22	0,360±0,05	0,995
2	619±14	0,087±0,007	0,946	724±11	-0,015±0,002	0,155±0,008	0,998	357±8	495±33	0,487±0,044	0,996
3	1081±6	0,213±0,002	0,999	1097±12	-0,003±0,0018	0,223±0,007	0,999	99±57	1010±38	0,254±0,029	0,999
4	804±14	0,242±0,008	0,992	862±19	-0,014±0,004	0,293±0,016	0,997	170±32	727±14	0,407±0,051	0,996
5	749±11	0,213±0,006	0,994	802±10	-0,01±0,002	0,257±0,008	0,999	174±19	667±8	0,377±0,032	0,999
6	753±14	0,201±0,007	0,989	827±9	-0,009±0,001	0,256±0,006	0,999	196±5	691±5	0,404±0,011	0,999
7	736±29	0,193±0,015	0,951	906±42	-0,029±0,009	0,328±0,035	0,993	261±18	771±68	0,587±0,077	0,989
8	787±17	0,226±0,009	0,989	858±29	-0,015±0,007	0,286±0,025	0,994	198±38	708±24	0,428±0,073	0,992

### ВИСНОВКИ

Криві течії (втім, як і стандартні механічні характеристики) зварювальної катанки марок G3Si1 та Св-08Г2С різних партій постачання суттєво відрізняються, що пов'язаний насамперед з умовами виготовлення напівфабрикату (з виробником). Хімічний склад в межах, визначених стандартами, чинить незначний вплив на механічні характеристики катанки.

Операція відпалу суттєво стабілізує криву течії матеріалів різних плавок незалежно від їх вихідних механічних характеристик в стані постачання. При цьому криві течії сталей G3Si1 та Св-08Г2С після відпалу статистично майже не відрізняються. Отже, при проектуванні процесу волочіння, його моделюванні варто користуватись саме кривими в стані відпалу.

При використанні катанки без операцій проміжного відпалу дійсні параметри, що реалізуються в процесі волочіння (енергосилові параметри, напруження, деформовність та ін.) можуть дещо відрізнитись від розрахункових, що вимагає вносити корективи в відповідні розрахунки із використанням конкретних значень коефіцієнтів кривої течії. В цьому випадку перед волочінням необхідно обов'язково проводити механічні випробування матеріалу, що дасть змогу оцінити можливості щодо технологічної переробки. При цьому варто орієнтуватись не на стандартні механічні характеристики, а на технологічні функції (зокрема криву течії, діаграму пластичності та ін.), що потребує розробки окремих методів оцінювання технологічних можливостей для певних умов волочіння конкретної партії катанки.

## СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Грушко О. В. Феноменологічні аспекти створення карт матеріалів для процесів холодного пластичного деформування / О. В. Грушко // *Обработка материалов давлением : сб. науч. тр. – Краматорск : ДГМА, 2013. – № 1 (34). – С. 85–95. – ISSN 2076-2151.*
2. Кроха В. А. Упрочнение металлов при холодной пластической деформации / В.А. Кроха. – М.: Машиностроение, 1980. – 155 с.
3. Полухин П. И. Сопротивление пластической деформации металлов и сплавов: справочник / П. И. Полухин, Г. Я. Гун, А. М. Галкин. – М.: Metallurgiya, 1983. – 352 с.
4. Третьяков А.В. Механические свойства сталей и сплавов при пластическом деформировании : справочник / А. В. Третьяков, Г. К. Трофимов, М. К. Гурьянова. – М. : Машиностроение, 1971. – 62 с.
5. Смирнов-Аляев Г. А. Экспериментальные исследования в обработке металлов давлением / Г. А. Смирнов-Аляев, В. П. Чикидовский. – Л. : Машиностроение, 1972. – 360 с.
6. Людвиг П. Основы технологической механики // *Расчеты на прочность: сборник научных трудов.* – М.: Машиностроение, 1970. – Вып. 15. – С. 130–166.
7. Swift M. W. Plastic instability under plane stress / M. W. Swift // *Int. J. Mech. Phys. Solid.* – 1952. – № 1. – P. 1–18.

## REFERENCES

1. Grushko O. V. Fenomenologichni aspekty stvorenniya kart materialiv dlya protsesiv kholodnoho plastychnoho deformuvannya / O. V. Grushko // *Obrabotka materialov davleniem : sb. nauch. tr. – Kramatorsk : DGMA, 2013. – № 1 (34). – S. 85–95. – ISSN 2076-2151*
2. Kroha V. A. Uprochnenie metallov pri holodnoj plasticheskoy deformacii / V.A. Kroha. – M.: Mashinostroenie, 1980. – 155 s.
3. Poluhin P. I. Soprotivlenie plasticheskoy deformacii metallov i splavov: spravochnik / P. I. Poluhin, G. Ja. Gun, A. M. Galkin. – M.: Metallurgija, 1983. – 352 s.
4. Treť'jakov A.V. Mehanicheskie svojstva stalej i splavov pri plasticheskom deformirovanii : spravochnik / A. V. Treť'jakov, G. K. Trofimov, M. K. Gur'janova. – M. : Mashinostroenie, 1971. – 62 s.
5. Smirnov-Aljaev G. A. Eksperimental'nye issledovanija v obrabotke metallov davleniem / G. A. Smirnov-Aljaev, V. P. Chikidovskij. – L. : Mashinostroenie, 1972. – 360 s.
6. Ljudvig P. Osnovy tehnologicheskoy mehaniki // *Raschety na prochnost': sbornik nauchnyh trudov.* – M.: Mashinostroenie, 1970. – Vyp. 15. – S. 130–166.
7. Swift M. W. Plastic instability under plane stress / M. W. Swift // *Int. J. Mech. Phys. Solid.* – 1952. – № 1. – P. 1–18.

Грушко О. В. – д-р техн. наук, проф., ВНТУ

Слободянюк Ю. О. – інженер-технолог, ПАТ «ПлазмаТек»

Ткаченко Р. С. – викладач науково-методичного відділу ВВПУ ЛДУБЖД

ВНТУ – Вінницький національний технічний університет, м. Вінниця.

ВВПУ ЛДУБЖД – Вінницьке вище професійне училище Львівського державного університету безпеки життєдіяльності

E-mail: [grushko@svitonline.com](mailto:grushko@svitonline.com), [juliya\\_slobodyanyuk@mail.ru](mailto:juliya_slobodyanyuk@mail.ru)