

**Паладійчук Ю. Б.**

к.т.н., доцент

**Вінницький національний  
аграрний університет****Кордонський В. А.**

викладач

**відокремлений  
структурний підрозділ  
Чернятинський фаховий  
коледж Вінницького  
національного  
аграрного університету****Paladiychuk Yu.**

Ph.D., Associate Professor

**Vinnitsia National Agrarian  
University****Kordonsky V.**

teacher

**Separate Structural Unit  
Chernyatyn Vocational  
College of Vinnitsia National  
Agricultural University**

УДК 621.91

DOI: 10.37128/2306-8744-2020-4-9

**ОБҐРУНТУВАННЯ МЕХАНІКИ  
РУЙНУВАННЯ СТРУЖКИ ПРИ  
ПРОТЯГУВАННІ ЦИЛІНДРИЧНИХ  
ПОВЕРХОНЬ З ПРИПУСКОМ**

Вперше досліджено механіку руйнування стружки при зрізуванні припуску попередньо подільного технологічними канавками, і показано зв'язок між профілем та глибиною останніх і характеристиками напружено деформований стан в зоні стружкоутворення (відносним зсувом, усадкою стружки, кутом зсуву, переднім кутом, контактними процесами на передній поверхні).

У даній статті розглядається більш складна проблема – продовжній поділ стружки або припуску. Більшість дослідників схильні вважати, що цю проблему слід вирішувати за рахунок попереднього поділу припуску мережею спеціальних стружкоподільчих кільцевих або гвинтових канавок. Глибина цих канавок має складати 0,6...0,95 величини підйому на окремий зуб протяжки.

Результати дослідження механіки руйнування стружки описані при зустрічі інструменту з технологічною канавкою в процесі протягування. Показано зв'язок між будовою стружки та інтенсивно-деформованим станом в зоні формування стружки.

Із отриманих результатів витікає наступне. Попереднє деформаційне зміцнення за допомогою деформуючого протягування дозволяє збільшити твердість  $OM$  удвічі (сталь 10), до 60% (сталь 35), до 50% (сталь 45) і до 25% (алюмінієвий сплав АК6). При цьому суттєво зменшується коефіцієнт усадка стружки (відповідно у 2; 1,4; 1,4 і 1,3 рази) і дійсний попередній кут (при куті заточки  $\gamma=15^\circ$  відповідно: від  $36^\circ$  до  $18^\circ$ , від  $25^\circ$  до  $17^\circ$ , від  $21^\circ$  до  $16^\circ$  і від  $22^\circ$  до  $17^\circ$ ). Усе сказане свідчить про зниження напруженості процесу різання при збільшенні інтенсивності попереднього ХПД.

Визначено наступні мінімальні значення кута профілю канавки для досліджуваних матеріалів  $2\varphi_{min}$ :  $80^\circ$  (сталь 10);  $60^\circ$  (сталь 35);  $50^\circ$  (сталь 45 і сплав АК6).

Встановлено, що мінімальна глибина стружкоподільчої канавки  $h_c$  визначається із умови руйнування стружки при перевищенні дотичних напружень в зоні зсуву над опором зсуву оброблюваного матеріалу.

Отримано наступні значення мінімальної глибини стружкоподільчої канавки для досліджуваних матеріалів:  $h_{Cmin} = (0,4...0,55) S_z$  – сталі 35 і 45;  $h_{Cmin} = (0,55...0,6) S_z$  – сплав АК6.

**Ключові слова:** стружка, оброблюваний матеріал, сталь, канавка, протягування, різання.

**Вступ.** Поява нових конструкційних, складно-оброблювальних матеріалів ставить нові завдання про вирішення практичних задач їх механічної обробки.

Численними дослідженнями і практикою обробки матеріалів протягуванням доведено, що

характеристики процесів, що відбуваються на контактуючих поверхнях інструменту та заготовки, властивості інструментального і оброблюваного матеріалу, технологічне середовище істотно впливають на процес стружкоутворення і працездатність протягуючого інструменту. Поява



генеративних способів "конструювання" поверхні інструментів, перш за все вакуумно-плазмових покриттів відкрили нові можливості у вивченні цих взаємозв'язків і закономірностей.

Наявність взаємозв'язку між контактними характеристиками і стружкоутворенням дозволяє виявити вплив властивостей інструментального матеріалу на формування найважливіших параметрів процесу протягування і встановити закономірності формування вогнищ зносу інструменту.

Напружено деформуючий стан зони стружкоутворення для оброблюваних матеріалів при різальному протягуванні в умовах змінного припуску характеризується невеликою різницею між максимальними та мінімальними значеннями дотичних напружень (в межах 15%...30%), кутами зсуву  $\Phi = 25^\circ \dots 35^\circ$  та коефіцієнтами усадки стружки по довжині і товщині  $\xi = 2,2 \dots 3,2$  при несуттєвому збільшенні її ширини (до 2%), причому сама зона звужується до розмірів, які дозволяють без суттєвих похибок апроксимувати її площиною.

Визначення ступеня спрацювання і стійкості зубців різальної секції комбінованого інструменту здійснюється з використанням експрес-методики, оскільки повномасштабні повні стійкісні дослідження стосовно різального протягування складно провести в лабораторних умовах через їх велику тривалість, викликану високою стійкістю протяжок, і великими витратами матеріалу, потрібного для досліджень.

Сутність методики полягає в тому, що за результатами одного повного стійкісного дослідження для найбільш несприятливих умов протягування, за результатами якого будується одна повна типова крива "спрацювання-час", визначається критерій затуплення для даного оброблюваного матеріалу. Стійкість дільниці інструменту з іншими умовами ведення процесу визначається за результатами короточасних неповних дослідів, при виконанні яких стає відомим лише напрямок типових кривих. Це достатньо для отримання повної інформації про спрацювання усіх дільниць зубців різальної секції. Довжина фаски спрацювання визначається за допомогою лупи Брінелля ( $\times 24$ ) безпосередньо на експериментальному стенді або протяжному верстаті, а характер та природа спрацювання визначається за допомогою оптичного металографічного інструментального мікроскопа МИМ-8( $\times 120$ ).

Процес різання досліджувався різними методиками зокрема: миттєвої зупинки та фіксації процесу з одержанням "кореня" стружки для вивчення контактних явищ та напружено-деформованого стану пружно-пластичної зони; визначення допустимого ступеня заповнення стружкової канавки; поділу технологічних складових сили різання на сили на передній та

задній поверхнях інструменту; експрес-методики визначення стійкості та ступеня спрацювання інструменту та інших відомих і оригінальних методик. Для глибшого вивчення процесів вільного ортогонального та неортогонального різання зі змінною шириною зрізування у дослідженнях застосовувалось моделювання цих процесів струганням та точінням на призматичних та круглих зразках з попередньо сформованим рельєфом.

Вважається, що властивості матеріалу інструменту впливають на процес стружкоутворення значно менше, ніж властивості оброблюваного матеріалу. Помітний вплив на параметри стружкоутворення має теплопровідність інструментального матеріалу і його контактна активність.

#### **Аналіз досліджень і публікацій.**

Пластичні властивості металів проявляються в різній мірі в залежності від тиску і швидкості ковзання одна по іншій поверхонь взаємодіючих матеріалів. Суттєвий вплив на протікання пластичної деформації стружкоутворення надають також хімічний склад і механічні властивості оброблюваного металу, товщина зрізуваного шару, значення переднього кута, визначального положення передньої поверхні. Ці та інші, менш активні діючі фактори визначають конкретне проявлення пластичної деформації і зовнішній вид зрізуваної стружки. Стружкоутворення не являється стабільним процесом, із зміною конкретних умов різання процес утворення і зовнішній вид зрізуваної стружки суттєво змінюється.

При протягуванні поверхонь з припуском, є серйозна проблема подрібнення стружки.

**Метою досліджень є** процес внутрішнього протягування, зокрема протягування круглих глибоких отворів, обов'язково повинен відбуватися в умовах примусового поділу стружки або припуску. При цьому так званий поперечний поділ стружки тобто поділ по периметру отвору, як правило, здійснюється за рахунок конструктивних елементів на зубцях протяжки і на сьогодні не є надто складною проблемою. Проте і в цьому напрямку є певні резерви, зокрема такі, що стосуються підвищення стійкості інструменту.

Дослідження показали, що вплив деформаційного зміцнення за допомогою ДП на процес стружкоутворення є суттєвим і полягає, в першу чергу, у зниженні інтенсивності наростоутворення.

Для вивчення явищ у зоні контакту інструмента з оброблюваним матеріалом, наростоутворення та пружно-пластичної зони (зони стружкоутворення) було застосовано метод миттєвої зупинки та фіксації процесу з допомогою пристрою "різець, що падає". Відомо, що цей метод надає найбільш повну інформацію про вказані явища. Отримані за допомогою даного



методу “корені” стружки фіксувались епоксидною смолою у трубчастих обоймах і готувались для досліджень за відомою технологією виготовлення металографічних шліфів. В подальшому “корені” стружки вивчались методами мікротвердості та графо-аналітичної обробки текстури.

У даній же частині нашого дослідження вивчається більш складна проблема – поздовжній поділ стружки або припуску. Більшість дослідників схильні вважати, що цю проблему слід вирішувати за рахунок попереднього поділу припуску мережею спеціальних стружкоподільчих кільцевих або гвинтових канавок. За даними праць [1,2] глибина цих канавок має складати 0,6...0,95 величини підйому на окремих зуб протяжки або

загальної величини припуску, а крок  $L_{z1}$  має визначатися із залежності:

$$L_{z1} = C_m d_0^2 S_z, \quad (1)$$

причому  $C_m$  – коефіцієнт, який враховує властивості оброблюваного матеріалу, для матеріалів, які використовувались у нашому дослідженні, може бути визначений із табл.1.

Із залежності (1) видно, що діаметр отвору та товщина зрізу також суттєво впливають на форму і розміри валика стружки, а отже – і на крок канавок. Кут при вершині канавки традиційного трикутного профілю повинен знаходитись в межах  $45^\circ \dots 95^\circ$  з міркувань технологічності формування останньої.

Таблиця 1

Значення коефіцієнта  $C_m$

$S_z$ , мм	Сталі, $\sigma_b$ , Мпа		Сплави на основі алюмінію
	до 400	400-700	
до 0,03	0,005	0,010	0,007
0,03-0,06	0,0045	0,007	0,006
0,06-0,10	0,004	0,006	0,005
0,10-0,15	0,0035	0,005	0,0045
понад 0,15	0,003	0,0045	0,004

У той же час наведені дані не враховують механіки руйнування стружки при зустрічі різального клина з технологічною канавкою. Очевидно, що це не має значення у випадках, коли глибина канавки перевищує величину загального припуску, тобто коли макрорельєф виконує подвійні функції – експлуатаційні та поділ припуску. Проте, коли технологічні канавки використовуються лише для поліпшення процесу протягування, слід більш точно визначати характеристику профілю канавки (кут при вершині  $2\phi$  та глибину  $h$ ). Визначити ці характеристики можна, використавши елементи механіки процесу різання.

Модель такого процесу для умов, коли низькі швидкості різання та інші фактори сприяють інтенсивному наростоутворенню, високим контактним напруженням та низьким температурам, що характерно саме для різального протягування, доцільно подати наступним чином (рис. 1, а). До зустрічі зі стружкоподільчою канавкою 1 процес різання має стаціонарний характер і протікає з утворенням на передній поверхні інструмента 2 стабільного тіла наросту 3, який утворюється з матеріалу 4 деталі, і фактично є частиною різального клину з дійсним переднім кутом  $\gamma_n$ . Зона зсуву 5, де матеріал, що обробляється, перебуває переважно у пластичному стані, нахилена до напрямку швидкості різання  $V$  під кутом зсуву  $\Phi_{zc}$  і оскільки допустимість заміни об'ємної зони зсуву однією площиною доведена у працях [3, 4, 5.] для умов різання матеріалу, зміцненого холодною

деформацією, застосуємо це допущення і для нашої моделі. Для контактних явищ на передній

поверхні найбільш придатною і зручною для розрахунків є схема напружено-деформованого стану, запропонована проф. Полетикою М.Ф. [6], яка, на відміну від моделей проф. Кушнера В.С. [7] і проф. Мазура М.Л. [8], передбачає постійність дотичних контактних напружень  $T_{Fn}$  на пластичній ділянці  $S_1$  контакту стружки з передньою поверхнею інструменту. Це означає, що додатковим зміцненням матеріалу стружки на цій ділянці можна знехтувати через незначний приріст зміцнення при величинах деформації зсуву, що перевищують величину  $\epsilon \geq 5 \dots 10$ . При таких деформаціях матеріал стружки уже перебуває в стані, близькому до межі зміцнення. На схемі сил, показаній на рис. 1, а, подано лише сили, які діють на передній поверхні інструмента:  $R_c$ ,  $R_{zn}$ ,  $R_{yn}$  – відповідно сила стружкоутворення та її складові, величина яких визначає кут дії;  $N$ ,  $F$  – відповідно нормальна сила і сила тертя, величина яких визначає кут тертя  $\eta$ ;  $P_{zc}$  – дотична сила в площині зсуву, нахилений до напрямку швидкості різання під кутом зсуву  $\Phi_{zc}$ ;  $q_n$ ,  $T_{Fn}$  – відповідно контактний тиск та дотичні напруження на передній поверхні. Коефіцієнт усадки стружки  $\xi$  для схеми різання, що аналізується, визначається відношенням товщини стружки  $Z$  до товщини зрізу  $S_z$ .

Кут зсуву  $\Phi_{zc}$  і дії  $\omega$ , а також дійсний кут  $\gamma_n$  у поєднанні з дотичними напруженнями  $t_c$  у зоні зсуву (стружкоутворення) визначають силу стружкоутворення, яка може бути розрахована або визначена експериментально. У першому випадку (див. рис. 1, а):



$$R_c = \frac{\tau_c S_z \alpha}{\cos(\Phi_{zc} + \omega) \sin \Phi_{zc}}, \quad (2)$$

де:  $a$  – ширина зрізу.

При цьому, згідно з дослідженнями проф. Розенберга О.М. [9]:

$$\tau_c = 0,185 HV. \quad (3)$$

Дотична сила в площині зсуву  $P_{zc}$ , в свою чергу, може бути розрахована за залежністю:

$$P_{zc} = \tau_c \xi S_z \alpha, \quad (4)$$

або визначена на основі експериментального дослідження сил різання:

$$P_{zc} = \frac{P_{zn} \cos(\Phi_{zc} + \omega)}{\cos \omega} \quad (5)$$

причому з урахуванням відомої залежності докт. техн. наук Виноградова О.О. [10]:

$$\operatorname{tg} \Phi_{zc} = \frac{1 + \operatorname{tg} \frac{\gamma_H}{2} - 1,8 \cos \gamma_H \operatorname{tg}(\omega + \gamma_H)}{1 - \operatorname{tg} \frac{\gamma_H}{2} + 1,8 \sin \gamma_H \operatorname{tg}(\omega + \gamma_H)}, \quad (10)$$

де:  $\eta$  – кут тертя

$$\eta = \omega + \gamma_H \quad (11)$$

Особливістю даного розрахунку є той факт, що для наших умов найважче визначити дійсний передній кут, який є значно більшим від переднього кута інструмента, і для його експериментального дослідження потрібно провести трудомісткі досліди з отриманням «коренів» стружки або провести непрямі дослідження через вивчення процесу зовнішнього тертя (11). Вочевидь, досить точні результати по визначенню  $\gamma_H$  може дати така послідовність розрахунків: (8)→(9)→(10), де невідомою є величина дійсного переднього кута з урахуванням тіла наросту.

При наближенні інструмента до стружкоподільчої канавки можливі два випадки зміни напружено-деформованого стану зони стружкоутворення і процесу різання в цілому. У першому випадку, коли  $h_c \approx S_z$ , тобто коли глибина канавки є рівною або несуттєво меншою від товщини зрізу (рис. 1.6), процес різання на короткий час переривається і усі явища, що його супроводжували, зникають (зона зсуву, тіло

$$\omega + \Phi_{zc} = 43^\circ \dots 46^\circ \approx \pi/4 \quad (6)$$

отримуємо:

$$P_{zc} = \frac{0,7 P_{zn}}{\cos \omega}, \quad (7)$$

Із рис. 1, а видно, що кут дії може бути визначений експериментально із залежності:

$$\omega = \arctg \frac{P_{yz}}{P_{zn}}, \quad (8)$$

а кут зсуву, з урахуванням виразу (6):

$$\Phi_c = \frac{\pi}{4} - \arctg \frac{P_{yz}}{P_{zn}}, \quad (9)$$

При цьому, використання і застосування до наших умов відомої залежності проф. Абуладзе Н. Г. [11], отримуємо співвідношення між кутами  $\Phi_{zc}$ ,  $\omega$ ,  $\eta$ ,  $\gamma_H$ :

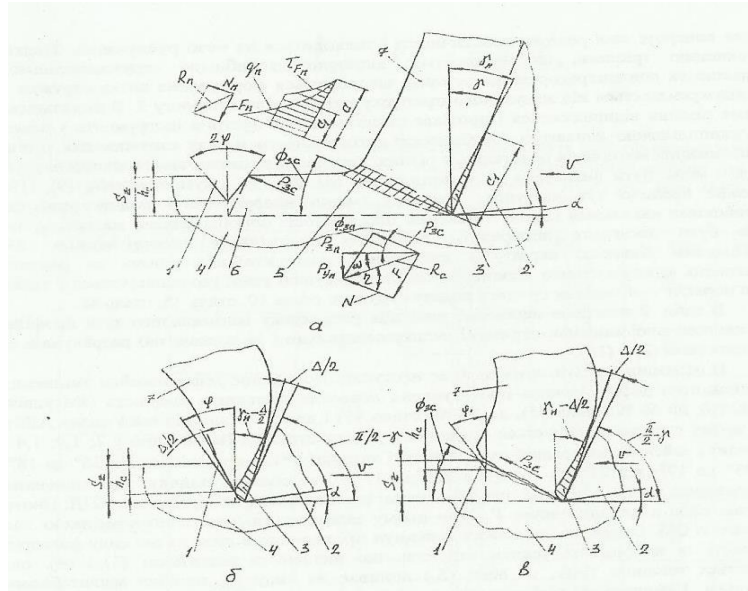
наросту, контактні процеси на передній поверхні тощо).

Протяжки працюють в зоні активного наростоутворення. Наявність на передній поверхні наросту веде до того, що фактичний передній кут, визначає характер деформуючих процесів в зоні утворення стружки, що в свою чергу наростоутворення формує зміну переднього кута різального зуба протяжки.

Що стосується тіла наросту, то за даними досліджень [1, 12], воно (це тіло) залишається на стружці після завершення процесу протягування без зменшення об'єму. При цьому формування валика стружки завершується і він (цей валик) переміщується уздовж поверхні заготовки в напрямі руху зуба інструменту. Сили різання миттєво падають до нуля, що фіксується динамометром. В цьому випадку важливо витримати наступну умову:

$$\varphi = \gamma_H + \Delta, \quad (12)$$

де:  $\gamma_H$  – передній кут інструменту без наросту;  $\Delta$  – кут, який запобігає контакту бокових стінок канавки при руйнуванні стружки.



**Рис. 1. Модель механіки процесу руйнування стружки за допомогою стружкоподільчої канавки, сформованої на припуску заготовки, при вільному ортогональному різанні з низькими швидкостями при товщинах зрізу, що перевищують глибину канавки ( $S_z \geq h_c$ ):**

а – процес стаціонарного різання, коли межа зони стружкоутворення ще не досягла канавки; б – процес руйнування стружки для випадку, коли  $S_z \leq h_c$ ; в – процес руйнування стружки, коли  $S_z \gg h_c$ . 1 – стружкоподільча канавка; 2 – різальний клин; 3 – тіло наросту; 4 – оброчлюваний матеріал; 5 – зона зсуву (стружкоутворення); 6 – припуск; 7 – стружка.

Чим щільніше прилягають один до одного витки стружки, тим менше діаметр одержуваного валика стружки, зрізання по всій довжині оброблювальної заготовки, і тим менший об'єм необхідний для його розміщення в стружковій канавці. Зрізувана стружка, як при точінні, звертується в просторову спіраль. Вона займає більший об'єм, що викликають ускладнення при розміщенні в стружковій канавці.

Якщо вказана умова не буде витримана, то стінки зруйнованої канавки вступають в контакт між собою із загрозою заклинювання валика стружки і як, наслідок, - з різким погіршенням якості поверхні отвору деталі. Очевидно, що значення кута  $\Delta$  знаходиться в межах загальноприйнятих значень задніх кутів інструмента, тобто  $\Delta = 3^\circ \dots 10^\circ$ . В іншому випадку, коли глибина стружкоподільчої канавки значно менша від товщини зрізу ( $h_c \ll S_z$ ), слід очікувати наступні явища при наближенні зуба інструменту до канавки (рис. 1, в). В момент, коли зовнішня границя зони стружкоутворення перетинає канавку 1, остання ініціює виникнення і миттєве розповсюдження тріщини уздовж умовної площини зсуву, тобто під кутом зсуву  $\Phi_{zc}$ . Такий напрямок тріщини пояснюється тим, що саме на межі між зоною стружкоутворення і стружкою оброблюваний матеріал отримує, завдяки високим значенням

деформації зносу, такі величини холодного деформаційного зміцнення, які наближаються до максимально допустимих для даного матеріалу. Тобто цей матеріал майже вичерпує свої резерви пластичності і знаходиться на межі руйнування. Завдяки виникненню тріщини, що ініціюється відносно неглибокою стружкоподільчою канавкою як концентратором напружень, завершується формування витка стружки 7, яка відокремлюється і пртікає стаціонарно до зустрічі інструмента з новою стружкоподільчою канавкою. Особливості поздовжнього поділу стружки для різних оброблюваних матеріалів полягають у різних значеннях дотичної сили в площині зсуву  $P_{zc}$ , яка може бути визначена за залежностями (4) або (5), і кута зсуву  $\Phi_{zc}$  (9), (10). Загальне правило тут наступне: кращому (менш напруженому) поділу припуску неглибокими сприяє зниження пластичності оброблюваного матеріалу, яке може бути досягнуте попереднім холодним пластичним деформуванням, або збільшення кількості перліту у вуглецевих доевтектоїдних сталях за рахунок збільшення вмісту вуглецю. Таким чином, досліджувані сталі розташовуються у такий ряд в порядку поліпшення процесу поділу поліпшення процесу поділу стружки: сталь 10, сталь 35, сталь 45.

В табл. 2 наведено необхідні дані для розрахунку мінімального кута профілю



стружкоподільчої канавки, отримані експериментально і за допомогою розрахунків за залежностями (2)-(12).

**Результати досліджень.** Із отриманих результатів витікає наступне. Попереднє деформаційне зміцнення за допомогою деформуючого протягування дозволяє збільшити твердість ОМ удвічі (сталь 10), до 60% (сталь 35), до 50% (сталь 45) і до 25% (алюмінієвий сплав АК6). При цьому суттєво зменшується коефіцієнт усадка стружки (відповідно у 2; 1,4; 1,4 і 1,3 рази) і дійсний попередній кут (при куті заточки  $\gamma=15^\circ$  відповідно: від  $36^\circ$  до  $18^\circ$ ; від  $25^\circ$  до  $17^\circ$ ; від  $21^\circ$  до  $16^\circ$  і від  $22^\circ$  до  $17^\circ$ ). Усе сказане свідчить про зниження напруженості процесу різання при збільшенні інтенсивності попереднього ХПД. Проте дотична сила в площині зсуву  $P_{зс}$  при цьому залишається практично незмінною для кожного із ОМ. Очевидно, це можна пояснити протилежною дією на цю силу факторів твердості та коефіцієнта усадки стружки, що витікає із залежності (3) і (4), що стосується товщини зрізу, то вона ( $S_z$ ) впливає на силу  $P_{зс}$  подібно масштабному факторові. І нарешті, із цієї частини дослідження можна зробити висновок, що без урахування фактора ХПД слід призначити наступні мінімальні величини кута профілю стружкоподільчої канавки  $2\phi_{min}$ :  $80^\circ$  (сталь 10);  $60^\circ$  (сталь 35);  $50^\circ$  (сталь 45 і сплав АК6). ХПД зменшує величину  $2\phi_{min}$ ,

однак при цьому починає домінувати технологічний чинник виготовлення канавки.

Що стосується мінімальної глибини  $h_c$  стружкоподільчої канавки, то її знаходження зводиться до наступного. Відомо [30], що умовою пластичності при утворенні зливної стружки в процесі різання є рівність дотичних напружень  $\tau_c$  в зоні зсуву опору зсуву  $\tau_s$  оброблюваного матеріалу, тобто:

$$\tau_c = \tau_s. \quad (13)$$

Очевидно, що для руйнування стружки потрібно створити умови, коли ця рівність порушується:

$$\tau_{c1} = \tau_s. \quad (14)$$

Згідно зі схемою стружкоутворення та руйнування стружки, поданою на рис. 2, впливати на дотичні напруження  $\tau_{c1}$  у бік їх збільшення можна лише через довжину ОА площини зсуву, оскільки ширина  $a$  цієї площини при вільному ортогональному різанні залишається незмінною, а дотична сила в площині зсуву  $P_{зс}$ , як було показано вище (див. табл. 1), для даного оброблюваного матеріалу залишається незмінною для різних умов протікання процесу різання.

Таблиця 2

Значення сили в площі зсуву  $P_{зс}$ , дійсного переднього кута  $\gamma_n$  та мінімального кута профілю стружкоподільчої канавки  $2\phi_{min}$  при вільному ортогональному різанні досліджуваних матеріалів ( $V = 0,13$  м/с;  $a = 10$  мм; РІ – сталь Р6М5;  $\gamma = 15^\circ$ ;  $\alpha = 2^\circ$ ;  $\rho = 7$  мкм;  $\lambda = 0^\circ$ ; середовище сульфозфрезол – Р) і кут зазору між стружкою і канавкою  $\Delta = 8^\circ$

ОМ	HV, МПа	$\xi$	$S_z$ , мм	$P_{зс}$ , Н	$\gamma_n$ , град	$2\phi_{min}$ , град
Сталь 10	1200	3,9	0,02	173	36	80
			0,05	433		
			0,10	866		
	1800	2,7	0,02	178	26	60
			0,05	450		
			0,10	899		
	2400	1,9	0,02	169	18	44
			0,05	422		
			0,10	845		
Сталь 35	1600	3,1	0,02	184	25	58
			0,05	459		
			0,10	918		
	2100	2,6	0,02	202	20	48
			0,05	505		
			0,10	1020		
	2600	2,2	0,02	212	17	42
			0,05	529		



			0,10	1060		
Сталь 45	1900	2,9	0,02	204	21	50
			0,05	510		
			0,10	1020		
	2400	2,4	0,02	213	18	44
			0,05	533		
			0,10	1065		
2900	2,1	0,02	225	16	40	
		0,05	563			
		0,10	1110			
Алюмінієвий сплав АК6	650	3,2	0,02	77	22	52
			0,05	192		
			0,10	385		
	450	2,8	0,02	78	19	46
			0,05	194		
			0,10	388		
	850	2,6	0,02	82	17	42
			0,05	204		
			0,10	410		

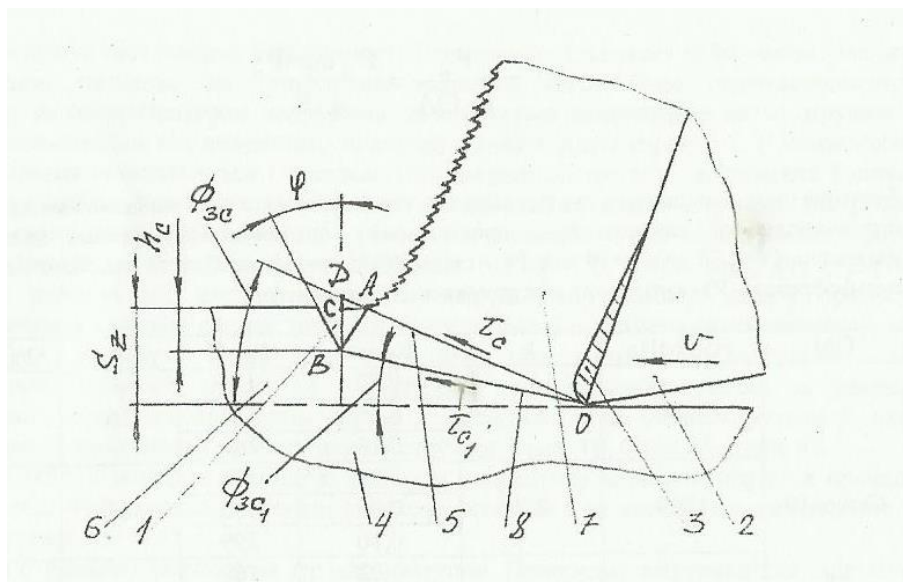


Рис. 2. Схема для розрахунку характеристик процесу руйнування при  $h_c \ll S_z$ : 1 – стружкоподільча канавка; 2 – різальний клин; 3. тіло наросту; 4 – оброблюваний матеріал; 5 – площа зсуву; 6 – припуск; 7 – стружка; 8 – площа руйнування стружки

Створення стружкоподільчої канавки глибиною  $h_c$  якраз дозволяє зменшити довжину площини зсуву до величини  $OB$ , значення якої може бути розраховане за залежністю:

$$OB = \frac{S_z - h_c}{\sin \Phi_{zc1}}, \quad (16)$$

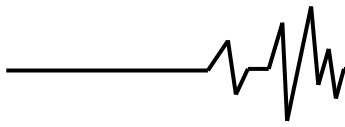
де  $\Phi_{zc1}$  – нове значення кута зсуву, яке визначає напрямок утворення тріщини при руйнуванні стружки, коли різальний клин

наближається до стружкоподільчої канавки (див. рис. 1, в).

Величина кута  $\Phi_{zc1}$  може бути розрахована із схеми, поданої на рис. 2:

$$\Phi_{zc1} = \arctg \frac{(S_z - h_c) \operatorname{tg} \Phi_{zc}}{(S_z + h_c) \operatorname{tg} \varphi \cdot \operatorname{tg} \Phi_{zc}} \quad (17)$$

Вивчення зовнішнього боку зливної стружки на «коренях» стружки показує, що поверхня стружки у цій її частині характеризується



наявністю «зубчиків», а висота яких не перевищує 3%...5% товщини стружки (див. рис.2.). Це явище свідчить про наявність мікрозсувів між окремими елементами стружки, які проте не спричиняють її руйнування. Про це явище свідчить також текстура в утвореній зливній стружці. Однак, у тих випадках, коли висота «зубчика» перевищує 10...15% товщини стружки, розпочинається процес переходу від зливної стружки до стружки зколювання завдяки концентрації деформації зсуву між окремими елементами стружки. Інакше кажучи, відбувається руйнування стружки з помітним зниженням опору  $\tau_s$ . Саме це явище відповідає моменту зустрічі зони зсуву із стружкоподільчою канавкою. Отже, гарантоване руйнування стружки слід очікувати при глибинах канавки, які визначаються із наступних міркувань (див. рис. 2).

$$AD = \frac{h_c \sin \varphi}{\cos \Phi_{zc}}, \quad (18)$$

$$AD = (0,1 \dots 0,15) S_z \xi, \quad (19)$$

$$h_{c \min} = \frac{(0,1 \dots 0,15) S_z \xi \cos \Phi_{zc}}{\sin \varphi} \quad (20)$$

Слід визначити, що кут нахилу площини між елементами стружки ( кут первинної текстури дещо перевищує кут зсуву  $\Phi_{zc}$  (на  $5 \dots 8^\circ$ ). Проте цим фактором можна знехтувати, як несуттєвим.

В таблиці 3 наведено результати розрахунків мінімально допустимої глибини стружкової канавки, а на рис. 3 експериментальна перевірка даних розрахунків, яка свідчить про добре співпадання отриманих результатів. Згідно з

даними розрахунків, мінімальна глибина стружкоподільчої канавки в залежності від умов проведення процесу в широкому діапазоні цих умов має складати 0,4...0,66 товщини зрізу. При цьому суттєво зменшують це співвідношення попереднє деформаційне зміцнення і набагато менше – зниження кута профілю канавки і товщини зрізу. Марка оброблюваного матеріалу, очевидно, впливає на глибину стружкоподільчої канавки через структурні складові, що мають різну сприйнятність до ХГД. Так, у сталі 10 переважає ферит, що добре зміцнюється, а в сталі 45 – перліт, який гірше наклепується, оскільки до його складу входить карбід заліза – цементит, який не зміцнюється холодною деформацією.

Із рис. 3 видно, що експериментальна перевірка розрахунків дає результати, головним чином, на 10% нижчі від розрахункових. Це пояснюється тим, що в розрахунках не бралась до уваги дія її вершини як концентратора напружень, який сприяє руйнуванню стружки.

В цілому для практичних розрахунків можна використовувати наступні співвідношення, що витікають із результатів досліджень.

Для сталі 10:

$$h_{c \min} = (0,35 \dots 0,50) S_z; \quad (21)$$

для сталей 35 і 45:

$$h_{c \min} = (0,45 \dots 0,55) S_z; \quad (22)$$

для алюмінієвого сплаву АК6:

$$h_{c \min} = (0,55 \dots 0,60) S_z. \quad (23)$$

Таблиця 3

Результати розрахунків мінімально допустимої глибини стружкоподільчої канавки  $h_{c \min}$  в залежності від ступеня ХГД оброблюваного матеріалу, кута профілю канавки  $2\varphi_{\min}$ , кута зсуву  $\Phi_{zc}$  і товщини зрізу при вільному ортогональному різанні досліджуваних матеріалів

( $V = 0,13$  м/с;  $a = 10$  мм; PI – сталь Р6М5;  $\gamma = 15^\circ$ ;  $\alpha = 2^\circ$ ;  $\rho = 7$  мкм;  $\lambda = 0^\circ$ ; середовище сульфидфрезол – Р)

ОМ	HV, МПа	$\xi$	$2\varphi_{\min}$ , град	$\Phi_{zc}$ ,град	$S_z$ , мм	$h_{c \min}$
1	2	3	4	5	6	7
Сталь 10	1200	3,9	80	20	0,02	0,011
					0,05	0,028
					0,10	0,057
	1800	2,7	60	25	0,02	0,009
					0,05	0,024
					0,10	0,049
2400	1,9	44	32	0,02	0,008	
				0,05	0,021	
				0,10	0,043	
Сталь 35	1600	3,1	58	25	0,02	0,011
					0,05	0,029
					0,10	0,058
	2100	2,6	48	30	0,02	0,011





	2600	2,2	42	34	0,05	0,027
					0,10	0,055
					0,02	0,010
					0,05	0,025
					0,10	0,051
Сталь 45	1900	2,9	50	28	0,02	0,012
					0,05	0,030
					0,10	0,060
	2400	2,4	44	33	0,02	0,011
					0,05	0,027
					0,10	0,054
	2900	2,1	40	37	0,02	0,010
					0,05	0,024
					0,10	0,049
Алюмінієвий сплав АК6	650	3,2	52	24	0,02	0,012
					0,05	0,030
					0,10	0,060
	450	2,8	46	28	0,02	0,011
					0,05	0,027
					0,10	0,054
	850	2,6	42	31	0,02	0,010
					0,05	0,024
					0,10	0,049

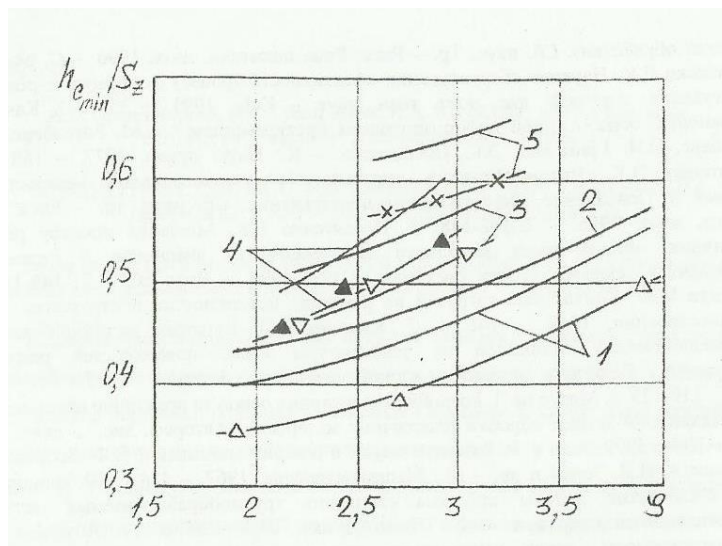


Рис. 3. Залежність відносної глибини стружкоподільчої канавки  $h_{cmin} / S_z$  від ступеня холодного деформаційного зміцнення ( $\xi$  – коефіцієнт усадки стружки), марки оброблюваного матеріалу (1, 2 – сталь 10; 3 – сталь 35; 4 – сталь 45; 5 – алюмінієвий сплав АК6) і товщина зрізу (1, 3, 4, 5 –  $S_z = 0,1$  мм;  $r - S_z = 0,02$  мм) при вільному ортогональному різанні ( $V = 0,13$  м/с;  $a = 10$  мм;  $P1$  – сталь Р6М5;  $\gamma = 15^\circ$ ;  $\alpha = 2^\circ$ ;  $\rho = 7$  мкм;  $\lambda = 0^\circ$ ; середовище сульфозфрезол – Р): суцільні криві – дані розрахунків; криві з експериментальними точками – дані експериментальних досліджень.

**Висновок.** Вперше досліджено механіку руйнування стружки при зрізуванні припуску попередньо подільного технологічними канавками, і показано зв'язок між профілем та глибиною останніх і характеристиками напружено деформуючого стану в зоні стружкоутворення (відносним зсувом, усадкою стружки, кутом зсуву, переднім кутом, контактними процесами на передній поверхні). У випадку, коли глибина канавки є рівною або

несуттєво меншою від товщини зрізу, кут профілю канавки  $2\phi$  повинен перевищувати подвійне значення переднього кута інструментами з урахуванням наросту  $2\gamma_n$  на величину кута  $\Delta$ , який запобігає контакту стінки канавки з торцем зруйнованої стружки; при цьому визначено, що  $\Delta = 3 \dots 10^\circ$ . У випадку, коли глибина канавки є значно меншою від товщини зрізу, руйнування стружки відбувається шляхом виникнення і миттєвого



розповсюдження тріщини уздовж умовної площини зсуву під кутом зсуву  $\Phi_{зс}$ . Визначено наступні мінімальні значення кута профілю канавки для досліджуваних матеріалів  $2\Phi_{\min}$ :  $80^\circ$  (сталь 10);  $60^\circ$  (сталь 35);  $50^\circ$  (сталь 45 і сплав АК6). Встановлено, що мінімальна глибина стружкоподільчої канавки  $h_c$  визначається із умови руйнування стружки при перевищенні дотичних напружень в зоні зсуву над опором зсуву оброблюваного матеріалу. Отримано наступні значення мінімальної глибини стружкоподільчої канавки для досліджуваних матеріалів:  $h_{c\min} = (0,4...0,55) S_z$  – сталі 35 і 45;  $h_{c\min} = (0,55...0,6) S_z$  – сплав АК6.

### Список використаних джерел

1. Посвятенко Э.К. Новые методы деления стружки при протягивании глубоких отверстий. Повышение эффективности протягивания (качество обработки). Сб. науч. Тр. – Рига: Риж: политехн. ин-т, 1990. – С. 64-74.2.
2. Посвятенко Е.К. Наукове обґрунтування ефективності процесу деформуюче-ріжучого протягування: Автореф. дис. докт. техн. наук. – Київ, 1993. – 35 с.
3. Качество поверхности, обработанной деформирующим протягиванием. А. М. Розенберг, О. А. Розенберг, Э. И. Гриценко, Э. К. Посвятенко. – К.: Наук. думка, 1977. – 88 с.
4. Посвятенко Э.К. Интенсификация протягивания дополнительной механической энергией. Повышение эффективности протягивания (качество обработки). Сб. науч. Тр. – Рига: Риж: политехн. ин-т, 1986. – С. 142-148.
5. Будяк Р. В., Паладійчук Ю.Б., Середя Л.П. ВДАУ, Писаренко В.Г. КНВО. Створення нових технологічних процесів з використанням прогресивних методів обробки деталей. «Форт». № 2. 2009.
6. Середя Л.П., Паладійчук Ю.Б., Будяк Р. В. Вплив дисипативних властивостей матеріалів протяжного інструменту на якість обробки гільз гідроциліндрів. ВНАУ. №2 (66). 2012.
7. Кушнир В.С. Влияние застойной зоны и термомеханических процессов на температуры износ поверхностей режущего инструмента. Резание и инструмент в технологических системах. – 1995-1996. – Вып. 50. – С. 119-125.
8. Є. Посвятенко, Н. Посвятенко, Р. Будяк, Л. Швець, Ю. Паладійчук, П. Аксом, І. Рибак, Б. Сабадач, В. Григоричен. Вплив матеріалу на технологічні фактори на поліпшення експлуатаційних властивостей деталей машин рельєфами та плівковими покриттями. Східноєвропейський журнал корпоративних

технологій. 2018. № 5/12 (95). ISSN 1729-3774. С. 48-56.

9. Ю. Паладійчук. Визначення конструкцій твердосплавних елементів для протягування отворів значного діаметру на основі оцінки їх міцності Східно-Європейський журнал корпоративних технологій. 2020. № 3. (7-105), С. 57-65 (Скопус), СНИП.

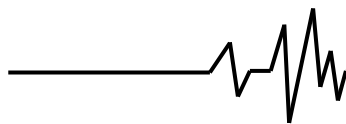
10. Виноградов А.А. Физические основы процесса сверления труднообрабатываемых металлов твердосплавными сверлами. – К.: Наука. Думка, 1985. 264 с.

11. Абуладзе Н.Г. Взаимозависимость углов направления сдвига, трения и переднего угла при образовании сливной стружки. Резание и инструмент в технологических системах. – 1995-1996. – Вып. 50. – С. 22-29.

12. Паладійчук Ю.Б. Формування макрорельєфів при протягуванні внутрішніх поверхонь циліндричної заготовки силових гідроциліндрів. Modern engineering and innovative technologies. Issue 10. Part 1. P. 74-79. ISSN 2567-5273. DOI: 10.30890. 2567-5273.2019-10-01-012.

### References

1. Posvyatenko E.K. (1990). New methods of chip division during drawing of deep holes. *Increase of drawing efficiency (processing quality)*. Sat. scientific Tr. - Riga: Rice: Polytechnic. Inst., - P. 64-74.2.
2. Posvyatenko E.K. (1993). Scientific substantiation of efficiency of process of deforming-cutting drawing: Author's abstract. dis. Dr. tech. Science. - Kyiv., - 35 p.
3. The quality of the surface treated by deforming stretching. A.M. Rosenberg, O.A. Rosengberg, E. I. Gritsenko, E. K. Posvyatenko. - K.: Nauc. opinion, 1977. - 88 p.
4. Posvyatenko EK Intensification of stretching by additional mechanical energy. Increasing the efficiency of stretching (processing quality). Sat. scientific Tr. - Riga: Rice: Polytechnic. Inst., 1986. - P. 142-148.
5. Budyak RV, Paladiychuk YB, Sereda LP VSAU, Pisarenko VG KNVO. Creation of new technological processes using advanced methods of machining parts. "Fort". № 2. 2009.
6. Sereda LP, Paladiychuk YB, Budyak RV Influence of dissipative properties of materials of the extended tool on quality of processing of sleeves of hydraulic cylinders. VNAU. №2 (66). 2012
7. Kushnir VS Influence of a stagnant zone and thermomechanical processes on temperature of wear of surfaces of the cutting tool. Cutting and the tool in technological systems. - 1995-1996. - Issue. 50. - P. 119-125.



8. E. Posviatenko, N. Posviatenko, R. Budyak, L. Shvets, Y. Paladiichuk, P. Aksom, I. Rybak, B. Sabadach, V. Hryhorychen. Influence of a material the technological factors on improvement of operating properties of machine parts by reliefs and film coatings. Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. 2018. № 5/12 (95). ISSN 1729-3774. P. 48-56.

9. Y. Paladiichuk. Desining the structures of solid-alloy elements for broaching the holes of significant diameter based on the assessment of their strength Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. 2020. № 3.(7-105), P. 57-65 (Scopus), SNIP.

10. Vinogradov A.A. Physical bases of the process of drilling hard-to-process metals with carbide drills. - K.: Science. Dumka, 1985. 264 p.

11. Abuladze NG Interdependence of shear, friction and anterior angle angles in the formation of drain shavings. Cutting and tools in technological systems. - 1995-1996. - Issue. 50. - P. 22-29.

12. Paladiychuk Yu.B. Formation of macroreliefs during drawing of internal surfaces of cylindrical preparation of power hydraulic cylinders. Modern engineering and innovative technologies. Issue 10. Part 1. P. 74-79. ISSN 2567-5273. DOI: 10.30890. 2567-5273.2019-10-01-012.

#### **ОБОСНОВАНИЕ МЕХАНИКИ РАЗРУШЕНИЯ СТРУЖКИ ПРИ ПРОТЯГИВАНИИ ЦИЛИНДРИЧЕСКИХ ПОВЕРХНОСТЕЙ С ПРИПУСКОМ**

Впервые исследован механику разрушения стружки при срезании припуска предварительно делящегося технологическими канавками, и показана связь между профилем и глубиной последних и характеристиками напряженно-деформированное состояние в зоне стружкообразования (относительным смещением, усадкой стружки, углом сдвига, передним углом, контактными процессами на передней поверхности).

В данной статье рассматривается более сложная проблема - продольный разделение стружки или припуска. Большинство исследователей склонны считать, что эта проблема следует решать за счет предварительного разделения припуска сетью специальных стружкоподильчих кольцевых или винтовых канавок. Глубина этих канавок должен составлять 0,6 ... 0,95 величины подъема отдельного зуб протяжки.

Результаты исследования механики разрушения стружки описаны при встрече инструмента технологической канавкой в процессе вытягивания. Показана связь между строением свирели и интенсивно-

деформированным состоянием в зоне формирования стружки.

С полученных результатов следует следующее. Предварительное деформационное упрочнение с помощью деформирующего протягивания позволяет увеличить жесткость ОМ вдвое (сталь 10), до 60% (сталь 35), до 50% (сталь 45) и до 25% (алюминиевый сплав АК6). При этом существенно уменьшается коэффициент усадка стружки (соответственно в 2, 1,4; 1,4 и 1,3 раза) и действительный предыдущий угол (при угле заточки  $\gamma = 15^\circ$  соответственно от  $36^\circ$  к  $18^\circ$ , от  $25^\circ$  к  $17^\circ$ , от  $21^\circ$  к  $16^\circ$  и от  $22^\circ$  к  $17^\circ$ ). Все сказанное свидетельствует о снижении напряженности процесса резания при увеличении интенсивности предыдущего ХПД

Определены следующие минимальные значения угла профиля канавки для исследуемых материалов  $2\phi_{\min}$ :  $80^\circ$  (сталь 10)  $60^\circ$  (сталь 35)  $50^\circ$  (сталь 45 и сплав АК6).

Установлено, что минимальная глубина стружкоподильчої канавки  $h_C$  определяется с условия разрушения стружки при превышении касательных напряжений в зоне оползня над сопротивлением сдвига обрабатываемого материала.

Получены следующие значения минимальной глубины стружкоподильчої канавки для исследуемых материалов:  $h_{C\min} = (0,4 \dots 0,55) S_z$  - стали 35 и 45;  $h_{C\min} = (0,55 \dots 0,6) S_z$  - сплав АК6.

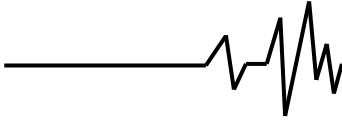
Ключевые слова: стружка, обрабатываемый матер, сталь, канавка, протягивания, резки.

#### **SUBSTANTIATION OF CHIPPING FRACTURE MECHANICS DURING DRAWING OF CYLINDRICAL SURFACES WITH ALLOWANCE**

The mechanics of chip fracture when cutting the allowance of pre-divisible technological grooves was studied for the first time, and the relationship between the profile and depth of the latter and the characteristics of the stress-strain state in the chip formation zone (relative shear, chip shrinkage, shear angle, front angle, contact processes).

This article discusses a more complex problem - the longitudinal division of chips or allowance. Most researchers are inclined to believe that this problem should be solved by pre-dividing the allowance by a network of special chip-splitting ring or screw grooves. The depth of these grooves should be 0.6... 0.95 of the amount of rise on a single tooth of the broach.

The results of the study of the mechanics of chip destruction are described when the tool meets the process groove in the drawing process. The connection between the structure of the pipe



and the intensively deformed state in the zone of chip formation is shown.

From the obtained results the following follows. Preliminary deformation hardening by means of deforming drawing allows to increase hardness of OM twice (steel 10), to 60% (steel 35), to 50% (steel 45) and to 25% (aluminum alloy AK6). This significantly reduces the shrinkage coefficient of chips (respectively 2; 1.4; 1.4 and 1.3 times) and the actual previous angle (at a sharpening angle  $\gamma = 15^\circ$ , respectively: from  $36^\circ$  to  $18^\circ$ ; from  $25^\circ$  to  $17^\circ$ ; from  $21^\circ$  to  $16^\circ$  and from  $22^\circ$  to  $17^\circ$ ). All this indicates a decrease in the intensity of the cutting process with increasing intensity of the previous HPD

The following minimum values of the groove profile angle for the investigated materials

$2\varphi_{\min}$  were determined:  $80^\circ$  (steel10);  $60^\circ$  (steel 35);  $50^\circ$  (steel 45 and alloy AK6).

It is established that the minimum depth of the chip-splitting groove  $h_C$  is determined from the condition of chip destruction when the tangential stresses in the shear zone are exceeded above the shear resistance of the processed material.

The following values of the minimum depth of the chip-splitting groove for the studied materials were obtained:  $h_{C\min} = (0.4... 0.55) S_z$  - steels 35 and 45;  $h_{C\min} = (0.55 (0.6) S_z$  - AK6 alloy.

Key words: shavings, processed material, steel, groove, drawing, cutting.

#### **Відомості про авторів**

**Паладійчук Юрій Богданович** – кандидат технічних наук, доцент кафедри агроінженерії та технічного сервісу Вінницького національного аграрного університету (вул. Сонячна, 3, м. Вінниця, 21008, Україна, e-mail: [rewet@vsau.vin.ua](mailto:rewet@vsau.vin.ua)).

**Кордонський Василь Анатолійович** - викладач технічних дисциплін, агротехнологічне відділення, відокремлений структурний підрозділ «Чернятинський фаховий коледж Вінницького національного аграрного університету» (вул. Графа Львова, 28 тел.(04332)32425 с. Чернятин Жмеринський р-н Вінницька обл. 23124, Україна. e-mail: [kordonskyi1969@gmail.com](mailto:kordonskyi1969@gmail.com)).

**Паладійчук Юрій Богданович** – кандидат технических наук, доцент кафедры «Агроинженерия и технического сервиса» Винницкого национального аграрного университета (ул. Солнечная, 3, г. Винница, 21008, Украина, e-mail: [rewet@vsau.vin.ua](mailto:rewet@vsau.vin.ua)).

**Кордонский Василий Анатольевич** - преподаватель технических дисциплин, агротехнологическое отделения, отдельное структурное подразделение «Чернятинский специализированный колледж Винницкого национального аграрного университета» (ул. Графа Львова, 28 тел. (04332)32425 с. Чернятин Жмеринский р-н. Винницкая обл. 23124, Украина. e-mail: [kordonskyi1969@gmail.com](mailto:kordonskyi1969@gmail.com) ).

**Yuriy Paladiychuk** – Candidate of Science (Engineering), Associate Professor of the Department of Agroengineering and Technical Service of Vinnytsia National Agrarian University (3 Soniachna St., Vinnytsia, 21008, Ukraine, e-mail: [rewet@vsau.vin.ua](mailto:rewet@vsau.vin.ua)).

**Kordonskyi Vasyl Anatoliyovych** - teacher of technical disciplines, agro-technological department, separate structural subdivision "Chernyatyn Vocational College of Vinnytsia National Agrarian University" (28 Grafa Lvova str., Tel. (04332) 32425, Chernyatyn village, Zhmerynskyi district, Vinnytsia region, 23 Ukraine e-mail: [kordonskyi1969@gmail.com](mailto:kordonskyi1969@gmail.com)).