

Міністерство освіти і науки України
Центральноукраїнський національний технічний університет
Кафедра «Машинобудування, мехатроніки і робототехніки»

ПОЯСНЮВАЛЬНА ЗАПИСКА

до кваліфікаційної роботи
на здобуття освітнього ступеня «Магістр»
за спеціальністю 133 «Галузеве машинобудування»

на тему:

**«Покращення оброблюваності пластичних матеріалів шляхом
вибору раціональних параметрів внутрішнього протягування»**

**«Improving the machinability of plastic materials by choosing
rational parameters of internal drawing»**

Виконавець: здобувач гр. ГМ(МВ)-21М1,9

_____ Ярослав РАКУЛЕНКО

Керівник: к.т.н., доц.

_____ Віталій МАЖАРА

Рецензент: к.т.н., доц.

_____ Дмитро БОГАТИРЬОВ

Зав. каф. ММіР: к.т.н., доц.

_____ Андрій ГРЕЧКА

Центральноукраїнський національний технічний університет

Факультет	Механіко-технологічний
Кафедра	Машинобудування, мехатроніки і робототехніки
Рівень вищої освіти	другий (магістерський)
Галузь знань	13 Механічна інженерія
Спеціальність	133 Галузеве машинобудування
Освітньо-наукова програма	Галузеве машинобудування

ЗАТВЕРДЖУЮ
Завідувач кафедри ММіР
Андрій ГРЕЧКА

«___» _____ 2023 р.

ЗАВДАННЯ НА ВИПУСКНУ КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ
ЗА ДРУГИМ (МАГІСТЕРСЬКИМ) РІВНЕМ ВИЩОЇ ОСВІТИ
ЗДОБУВАЧА ВИЩОЇ ОСВІТИ

Ярослава РАКУЛЕНКА

(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи: Покращення оброблюваності пластичних матеріалів шляхом вибору раціональних параметрів внутрішнього протягування

2. Керівник роботи: к.т.н., доц. Віталій МАЖАРА

3. Строк подання роботи до захисту 15 травня 2023 р.

4. Мета та завдання випускної кваліфікаційної роботи:

Метою роботи є покращення оброблюваності високопластичних матеріалів шляхом вибору раціональних параметрів процесу різання при внутрішньому протягуванні при забезпеченні необхідних параметрів стійкості інструменту.

Завдання:

- вивчення та аналіз результатів попередніх досліджень процесу протягування пластичних матеріалів;
- визначення впливу основних факторів процесу різання на оброблюваність при протягуванні високопластичних матеріалів;
- дослідження взаємозв'язку явищ при обробці протягуванням високопластичних сталей;
- вивчення впливу основних факторів процесу різання при протягуванні високопластичних матеріалів на стійкість інструменту протяжки;
- розробка рекомендацій для процесів протягування високопластичних сталей.

5. Консультанти по роботі, із зазначенням розділів

Розділ	Консультант	Підпис, дата	
		Завдання видав	Завдання прийняв
Науково-дослідний	Віталій МАЖАРА		
Організаційно-економічний	Ірина ЖУРИЛО		

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів роботи	Строк виконання етапів роботи	Примітка
1.	Огляд літературних джерел	Лютий-березень 2023	
2.	Вступ	Лютий- березень 2023	
3.	Мета та задачі роботи	Лютий- березень 2023	
4.	Методика роботи	Березень-квітень 2023	
5.	Теоретична робота	Березень-квітень 2023	
6.	Визначення економічної ефективності	Квітень-травень 2023	
7.	Висновки	Травень 2023	
8.	Оформлення роботи	Травень 2023	

Дата видачі завдання «____» _____ 2023 р.

Керівник роботи _____ Віталій МАЖАРА
(підпис)

Завдання прийнято до виконання «____» _____ 2023 р.

Здобувач _____ Ярослав РАКУЛЕНКО
(підпис)

Анотація

РАКУЛЕНКО Ярослав. Покращення оброблюваності пластичних матеріалів шляхом вибору раціональних параметрів внутрішнього протягування. Випускна кваліфікаційна робота для освітнього ступеня «магістр»: ЦНТУ, 2023. – 87 с. Матеріали презентації 10 іл.

Актуальність: Virішення питання про вибір раціональної з точки зору стійкості, геометрії інструмента, при широкому діапазоні зміни передніх і задніх кутів при обробці високопластичних матеріалів протягуванням є актуальним.

Метою роботи було покращення оброблюваності високопластичних матеріалів шляхом вибору раціональних параметрів процесу різання при внутрішньому протягуванні при забезпеченні необхідних параметрів стійкості інструменту. У роботі було проведено аналіз результатів попередніх досліджень процесу протягування пластичних матеріалів, визначено вплив факторів процесу різання на оброблюваність, досліджено взаємозв'язок явищ при протягуванні високопластичних сталей, визначено вплив факторів процесу різання на стійкість протяжки, розроблено практичні рекомендації для проектування конструкцій внутрішніх протяжок.

Практичне значення: запропоновано метод управління оброблюваністю високопластичних матеріалів при внутрішньому протягуванні шляхом зміни переднього кута, кута дії та ступеня переднього зміцнення обробного матеріалу. Розроблені практичні рекомендації проектування конструкцій внутрішніх протяжок для різання попередньо зміцненого матеріалу, що усувають негативний вплив нерівномірної твердості зрізуваного шару на стійкість протяжки.

Ключові слова: протягування, внутрішня протяжка, високопластична сталь, оброблюваність, стійкість.

Summary

RAKULENKO Yaroslav. Improving the machinability of plastic materials by choosing rational parameters of internal drawing. Graduation thesis for the educational degree "Master": CNTU, 2023. - 87 p. Presentation materials 10 slides.

Relevance: decision about the choice of rational from the point of stability, the geometry of the tool, with a wide range of changes in the front and rear cuts during the processing of high-plastic materials in broaching - relevant.

The method of work was to improve the processing of high-plastic materials by choosing rational parameters in the process of cutting with internal broaching while ensuring the necessary parameters in the stability of the tool. In the robot, an analysis was carried out of the results of the forward progress of the process of broaching plastic materials, the inclusion of factors in the process of cutting on the processing was determined, the mutual connection of the appearances was carried out during the broaching of high-plastic steels, the addition of factors in the process of cutting on the durability of the broach, detailed practical recommendations for the design of internal broach structures.

Practical meaning: a method of controlling the machinability of highly plastic materials during internal drawing by changing the front angle, the angle of action and the degree of preliminary hardening of the processing material is proposed. Developed practical recommendations for the design of internal broaching structures for cutting pre-strengthened material, which eliminate the negative impact of uneven hardness of the sheared layer on the stability of the broaching.

Key words: broaching, internal broach, highly plastic steel, machinability, stability

ЗМІСТ

ВСТУП.....	4
1. АНАЛІТИЧНИЙ ОГЛЯД ПАРАМЕТРІВ, ЩО ВПЛИВАЮТЬ НА ПРОЦЕС ПРОТЯГУВАННЯ.....	6
1.1. Процес формування стружки в стружковій канавці. Раціональні розміри стружкової канавки	6
1.2. Оброблюваність високопластичних сталей	12
1.3. Аналіз жорсткості різального інструмента	19
1.4. Стійкість різального інструменту при протягуванні	21
1.5. Висновки, мета та задачі дослідження	28
2. ВИЗНАЧЕННЯ ВПЛИВУ ОСНОВНИХ ФАКТОРІВ ПРОЦЕСУ РІЗАННЯ НА ОБРОБЛЮВАНІСТЬ ПРИ ПРОТЯГУВАННІ	30
2.1. Аналіз фізико-механічних властивостей обробного матеріалу	30
2.2. Методи покращення оброблюваності високопластичних сталей	36
2.3. Вплив попереднього зміцнення на оброблюваність при різанні	37
2.4. Вплив на оброблюваність пластичних матеріалів кута дії ω	40
2.5. Вплив переднього кута на оброблюваність пластичних матеріалів ...	46
2.6. Вплив швидкості різання на оброблюваність пластичного матеріалу	48
3. ВПЛИВ ОСНОВНИХ ФАКТОРІВ ПРОЦЕСУ РІЗАННЯ ПРИ ПРОТЯГУВАННІ НА СТІЙКІСТЬ ПРОТЯЖКИ	53
3.1. Різання незміцненого матеріалу	53
3.2. Визначання стійкості різального інструменту при обробці металу з різною твердістю	55

4. ТЕХНІКО-ЕКОНОМІЧНЕ ОБҐРУНТУВАННЯ РОБОТИ	62
4.1. Розрахунок основних техніко-економічних показників.....	62
4.2. Розрахунок показників економічної ефективності	68
4.3. Організаційно-планові розрахунки.....	70
 ВИСНОВКИ	 81
 СПИСОК ЛІТЕРАТУРНИХ ДЖЕРЕЛ.....	 83

ВСТУП

Для сучасного машинобудівного виробництва характерна необхідність максимальної гнучкості в виробництві з підвищенням продуктивності праці шляхом інтенсифікації режимів обробки при одночасному забезпеченні необхідної якості. Це пояснює масове впровадження у виробництво обробних центрів, технічні можливості яких дозволяють максимально ефективно забезпечити вимоги сучасного виробництва.

Разом з тим, залишається значна кількість технологічних задач, для вирішення яких доцільно застосовувати методи обробки, які реалізуються на спеціалізованому обладнанні, зі своїм характерним інструментом. До таких методів відноситься й процес обробки протягуванням інструментом протяжкою.

Протяжка унікальний інструмент, який при необхідності за один робочий хід здійснює обробку від чорнової до оздоблювально-зміцнювальної, забезпечує високі вимоги по якості – високу геометричну точність обробки та гарну якість обробленої поверхні, т.б. мале значення висоти мікронерівностей, а значить невисоке значення шорсткості.

Дослідженню процесу протягування присвятили свої роботи багато авторів. Результатом цих досліджень стали створені різні схеми різання при протягуванні, спроектовані та побудовані протяжні верстати, що реалізують ці схеми та розроблені методики розрахунку та проектування конструкцій різальних, деформуючих та комбінованих різально-деформуючих протяжок для обробки як пластичних матеріалів (сталі, алюміній та сплави і т.б.) так і крихких (чавуни, бронзи та ін.).

Тим не менше, залишаються ще питання недостатньо та неповно розглянуті дослідниками процесу протягування. До таких питань належить питання обробка протягуванням високопластичних малолегованих сталей, наприклад Сталь 10, Сталь 10ГН та ін.

Особливістю обробки високопластичних сталей є поєднання високої міцності та високої пластичності, що в процесі протягування призводить до інтенсифікації фізико-хімічних явищ, таких як збільшеної усадки стружки, виникнення та

активного протікання явища наростоутворення, схоплювання обробного та інструментального матеріалів, що може призвести до небажаних наслідків, погіршення процесу пакетування стружки в стружкових канавках протяжок, та навіть заклинюванню, погіршенню параметрів якості обробки збільшення значення шорсткості обробленої поверхні заготовки, зменшенню стійкості протяжки та навіть можливості її руйнування.

Таким чином, запропонована робота присвячена актуальній темі – вивченню питання покращення оброблюваності високопластичних сталей при протягуванні шляхом визначення впливу параметрів обробки на оброблюваність як незміцненої так і попередньо зміцненого обробного матеріалу. А також вивченню питання як впливає нерівномірний розподіл міцності по товщині заготовки типу втулка, що утворився завдяки попередньому зміцненню матеріалу перед протягуванням, на стійкість протяжного інструменту.

1. АНАЛІТИЧНИЙ ОГЛЯД ПАРАМЕТРІВ, ЩО ВПЛИВАЮТЬ НА ПРОЦЕС ПРОТЯГУВАННЯ

1.1. Процес формування стружки в стружковій канавці.

Рациональні розміри стружкової канавки

На відміну від інших способів обробки різанням при ріжучому протягуванні стружка не має вільного виходу й розміщується в стружковій канавці інструмента до закінчення операції. Тому розміщення стружки в стружковій канавці, вибір раціональних розмірів цієї канавки і її форми, є однією з головних умов працездатності протягування. Розміри стружкової канавки характеризуються глибиною западини h і величиною кроку зуба t . Співвідношення цих величин повинні вибиратися, виходячи з об'єму й виду стружки, знятому при протягуванні, більше, ніж це необхідно, об'єм стружкової канавки, приводить до небажаного збільшення довжини протягування, до необхідності застосування комплексу протяжок замість однієї або ослабленню міцності інструмента. Недостатній об'єм канавки приводить до заклинювання стружки в канавці, погіршенню якості обробленої поверхні (вириви, задири), до зростання сили протягування й, як наслідок – до розривання протяжки.

Важливому питанню розміщення стружки в стружковій канавці присвятили дослідження велика кількість дослідників [1, 2, 5, 9, 25, 27, 29, 30, 36, 39].

Щеголев А.В. [39] під коефіцієнтом заповнення канавки K розуміє відношення об'єму знятої стружки до обсягу шару металу, що перетворився на стружку, причому, K завжди повинне бути більше одиниці. Для спрощених розрахунків автор пропонує відношення об'ємів канавки й стружки замінити відношення площі активної частини канавки F_a до площі поздовжнього перетину стружки F_c :

$$\frac{F_a}{F_c} = \frac{\pi \cdot h^2}{4 \cdot a \cdot L} \geq K_{\min}. \quad (1.1)$$

Чим щільніше стружка скручується у виток, тим меншим може бути прийнятий коефіцієнт K . Аналізуючи формулу бачимо, що глибина стружкової

канавки залежить від товщини зрізу a , довжини протяжки L і коефіцієнта заповнення канавки K .

Грановський Г.І. [6] пропонує розрахункові умови на розміщення зрізуваної стружки, що, в об'ємі канавки на підставі умовної поміщуваності в межах активної площі перетину западини валика радіусом r_c , згорнутої в спіраль деформованої по довжині й товщині зрізаної стружки. Ця умова виражена рівнянням:

$$\frac{r}{r_c} \geq 1, \quad (1.2)$$

де: r – радіус закруглення западини між зубцями.

Автор вважає, що при нормальному стружкоутворенні зрізана стружка деформована в поздовжньому й поперечному напрямку, звивається в Архімедову спіраль.

Пропонована розрахункова умова $r_c < r$, буде виконуватися в тому випадку, коли сумарна довжина спіралі буде більше або, у крайньому випадку, дорівнювати довжині деформованої стружки, зрізаної з поверхні деталі довжиною L мм. Розрахункова умова буде мати вигляд:

$$\frac{\pi \cdot r^2}{q \cdot a} \geq \frac{K_a}{K_L}, \quad (1.3)$$

де: K_L – коефіцієнт поздовжньої усадки стружки;

K_a – коефіцієнт поперечної усадки стружки, дорівнює відношенню $\frac{d_0}{a_c}$;

q – коефіцієнт, що враховує наявність деякого зазору між окремими витками деформованої стружки.

Бобров В.Ф. [3] уточнив метод Грановського Г.І. На підставі експериментально отриманих даних про значення коефіцієнтів усадки тонких стружок він вніс у рівняння (1.3) наступні уточнення.

По-перше, у момент повного заповнення западини стружкою окремі витки стружки настільки щільно прилягають один до одного, що немає необхідності вводити коефіцієнт q . Замість цього коефіцієнта Бобров В.Ф. застосував коефіцієнт поперечної усадки K_a .

По-друге, оскільки коефіцієнт поперечної усадки залежить від товщини зрізу, а отже й підйому на зуб протяжки, то в розрахунковому вираженні K_a повинен бути не постійною величиною, а деякою функцією товщини зрізу.

Бобров В.Ф. [3] вважає, що між витками стружки є зазори, які варто враховувати введенням коефіцієнта щільності згортання стружкового валика, що дорівнює 1,1-1,2.

Подураев В.Н. [25] як критерій, що характеризує зміни обсягу металу при його перетворенні в стружку приймає об'ємний: коефіцієнт K . Цей коефіцієнт повинен показувати, у скільки разів об'єм займаний стружкою, став більше об'єму металу, перетвореного в стружку й пропонує наступну умову:

$$K = \frac{V_c}{V_m}, \quad (1.4)$$

V_c – об'єм займаний стружкою,

V_m – об'єм металу стружки.

Критеріями для визначення моменту заповнення завитком стружкової канавки автор вважає погіршення якості обробленої поверхні з моменту припинення нормального утворення стружки, що викликано зміною характеру деформації стружки, і припинення ковзання витка стружки в западині зуба. Це значить, що стружка ущільнена до межі й не може зайняти при збереженні умови її нормальної деформації об'єм, менший, ніж вона займає. Автор вважає, що зливна стружка, що дає завиток, заповнює не весь об'єм, а тільки її так звану робочу (активну) частина, залишаючи інший об'єм незаповненим.

Аналізуючи запропоновані методи, можна, незважаючи на певні розходження знайти в них загальне.

Автори [3, 6] у своїх рівняннях ураховують розширення стружки. Однак, при обробці пластичних матеріалів розширення стружки незначно, ним можна знехтувати.

Щеголев А.В. [39] висловлював припущення, що «характеристикою усадки стружки, достатньої для правильного рішення питання про розміщення стружки в стружкових канавках протяжки, може служити коефіцієнт усадки стружки». (Під коефіцієнтом усадки стружки він розумів величину зворотну усадці).

У роботах [2, 6, 39] автори роблять висновок, що на діаметр завитка головним чином впливає оброблюваний матеріал і товщина зрізу. Маргуліс Д.К. [30] вважає, що при обробці пластичних матеріалів сталеві стружка утворює спіраль, розміри якої залежать від властивостей матеріалу, товщини зрізу, величини переднього кута й форми стружкової канавки, глибину якої він рекомендує брати більше або рівної радіусу завитка стружки. У роботі [36] також пропонується при розрахунку стружкової канавки враховувати передній кут, товщину зрізу й оброблюваний матеріал.

Велике значення для сприятливого розміщення стружки має форма витка стружки. При обробці пластичних матеріалів спостерігається два випадки утворення витка стружок (рис. 1.1).

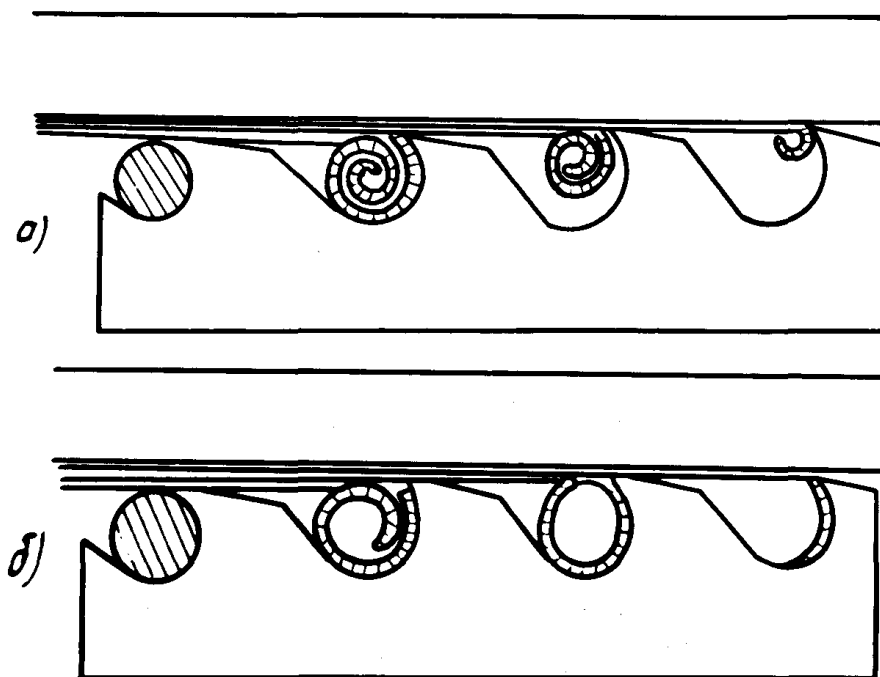


Рис. 1.1. Схеми утворення стружкового валика при обробці протягуванням пластичних матеріалів

Автори [5, 30, 31, 39] відзначають, що в першому випадку (рис. 1.1 а) на виток, що утворився, стружки малого діаметра намотується знімаєма стружка, збільшуючи, по мірі просування інструмента, діаметр валика стружки. Стружкоутворення відбувається доти, поки діаметр стружкового завитка не стане рівним величині стружкової канавки.

Після цього починається примусове стружкоутворення за рахунок зменшення зазору між витками, однак щільного примикання витків не відбувається подальше розміщення стружки в канавці відбувається при різкому зростанні сил різання.

Щільність валика зі сталі 45 автор роботи [6] пропонує визначати з залежності

$$\xi = (12,8 - 0,35\gamma - 21a_z + 0,4V) \cdot K_\eta \quad (1.5)$$

де: K_η – коефіцієнт, що враховує вплив змащувально-охолоджувальних рідин;

γ – передній кут в градусах;

a_z – товщина зрізу в мм;

V – швидкість різання в м/хв.

Інша форма витка стружки при протягуванні (рис. 1.1 б) характерна тим, що із самого моменту утворення витка стружка рухається по передній поверхні. Згортання стружки здійснюється радіусною поверхнею канавки й оброблюваною поверхнею. Така форма витка утрудняє стружкоутворення й супроводжується, як правило, збільшеними силами протягування. Форму витка, що утвориться, автори [5, 6] ставлять у залежність від товщини зрізу, усадки стружки й властивостей оброблюваного матеріалу.

У роботі [35] для визначення об'єму стружкової канавки, пропонується враховувати не тільки усадку стружки, товщину зрізу, але й форму стружкового валика, що на їхню думку в значній мірі залежить від переднього кута.

Горецкая З.А. [5] вважає, що для кожної товщини зрізу існує свій природний радіус завивання ρ , величина якого повинна бути пов'язана з характером пластичних деформацій і тертя. При $r > \rho$ (де r – радіус закруглення западини біля передньої поверхні, мм) має місце завивання стружки за схемою рис. 1.1 а. При $r < \rho$ стружка завивається примусово, схема на рис. 1.1 б. При завиванні за схемою рис. 1.1 б автор [5] вважає, що стружка розміщається більш економно, ніж за схемою рис. 1.1 а.

Для однієї й тієї ж товщини шару, що знімається, стружка може завиватися як вільно (рис. 1.1 а), так і примусово (рис. 1.1 б), залежно від розмірів западин зуба.

Якщо у своїй роботі [29] Пронкин Н.Ю. вважає, що розміщення зрізаної стружки в западині залежить від площі поздовжнього перетину стружки, усадки й щільності згортання витка (за умови вільного стружкоутворення при обробці жароміцних і титанових сплавів, приймаючи рівними коефіцієнти поздовжньої і поперечної усадок стружки, запропоноване рівняння прийме вид рівняння (1.1), то вже у роботі [29] він пропонує теоретичне рівняння для визначення радіуса завитка стружки. Відповідно до цього рівняння, радіус завитка стружки залежить від товщини зрізу, переднього кута, радіуса округлення ріжучої кромки, кута ϕ і механічних характеристик матеріалу. Це рівняння є єдиним теоретичним рівнянням для розрахунку радіуса завитка стружки.

Однак розрахункова схема, використовувана при виводі цього рівняння, на жаль, не позбавлена недоліків і вимагає доопрацювання. Вона зовсім не враховує процесів тертя, що відбуваються в зоні контакту різця зі стружкою, процес різання автором розбитий на ряд процесів, таких як деформація елементів зрізуваної стружки, і зсув по площині зсуву, що не зовсім відповідає загальноприйнятій думці [3, 9, 31, 35]. Аналізуючи роботи, присвячені дослідженню питання заповнення стружкою стружкових канавок можна відзначити, що найбільш доконаними є висловлення авторів [30, 35], які ставлять діаметр завитка в залежність від таких факторів, як вид оброблюваного матеріалу, товщина зрізу, величина переднього кута, форми стружкової канавки.

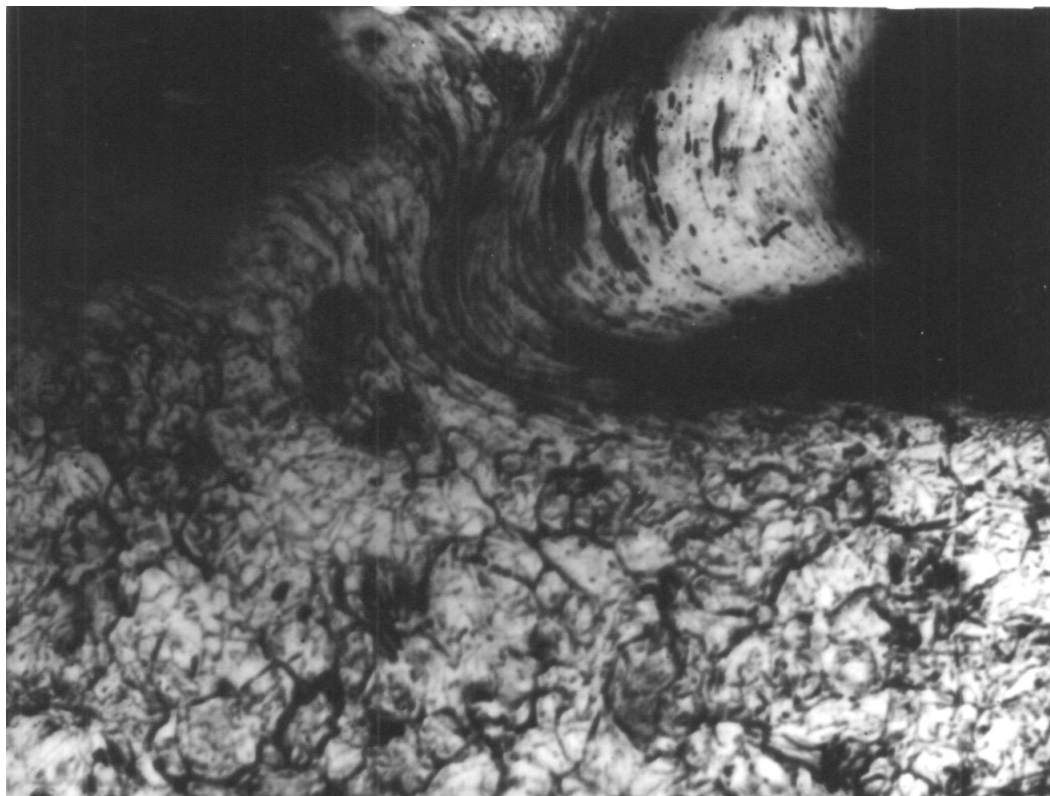
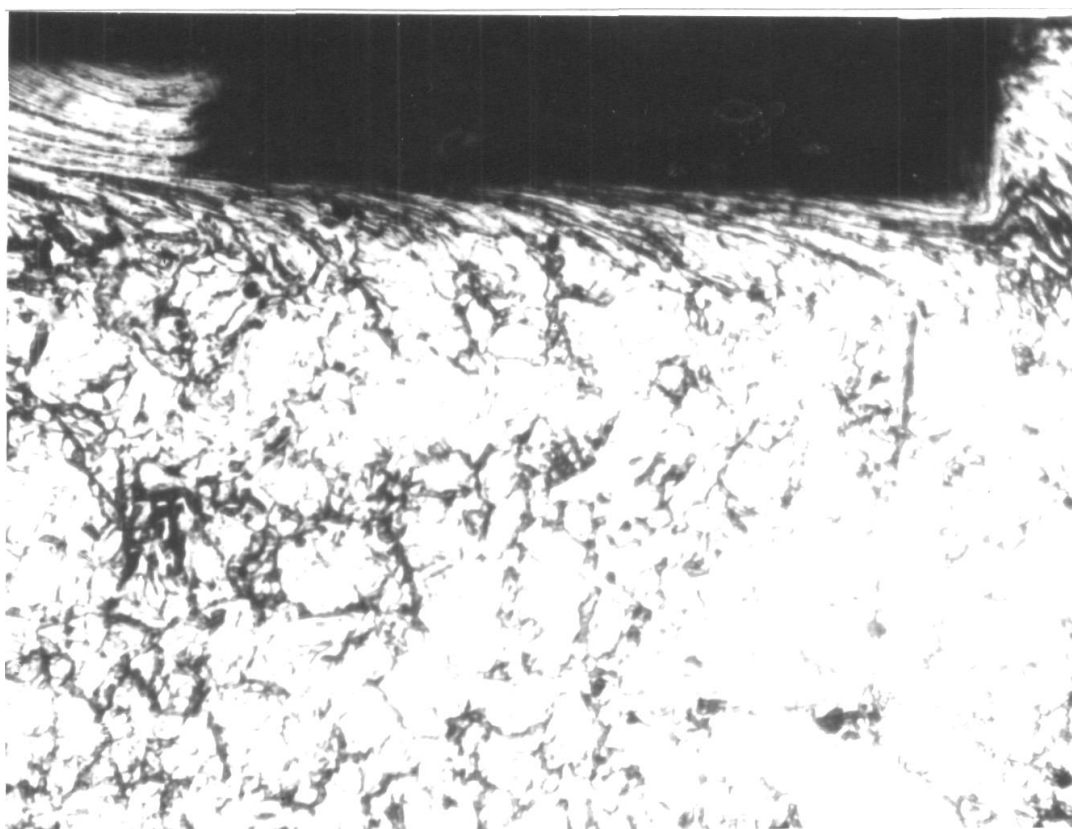
У висловленнях авторів зустрічаються розбіжності з приводу вибору критерію для визначення критичної довжини протяжки, тобто довжини різання, при досягненні якої припиняється нормальний процес стружкоутворення, а продовження процесу різання супроводжується додатковими деформаціями витка стружки. Так, у роботах [2, 8, 27, 29, 36] критична довжина протяжки (момент заповнення канавки) визначалася візуально. За критичну довжину приймали шлях, пройдений різцем до моменту деформації велика стружки.

Необхідно відзначити, що ряд авторів [29, 36], досліджуючи питання стружкозавивання, відзначали в момент заповнення стружкової канавки збільшення шорсткості обробленої поверхні, а автори [1, 27, 28, 29] крім того відзначали збільшення сили протягування. Використання зміни цих параметрів при досягненні критичної довжини протяжки може послужити підґрунтям для створення нової методики визначення критичної довжини з використанням стандартного устаткування, а в умовах виробництва визначати критичну довжину візуально по погіршенню оброблюваності або по зростанню навантаження верстата. Швидкість різання при використанні цього методу не обмежується. Виходячи з вищесказаного виходить, що створення однієї певної методики по визначенню критичної довжини протягування, із застосуванням широко використовуваних приладів і устаткування, рекомендація надійних критеріїв заповнення стружкової канавки дозволило б визначенню більш чітких рекомендацій з розрахунку й конструювання протяжного інструмента, що сприяло б збільшенню надійності й стійкості протяжного інструмента, підвищенню продуктивності процесу протягування.

1.2. Оброблюваність високопластичних сталей

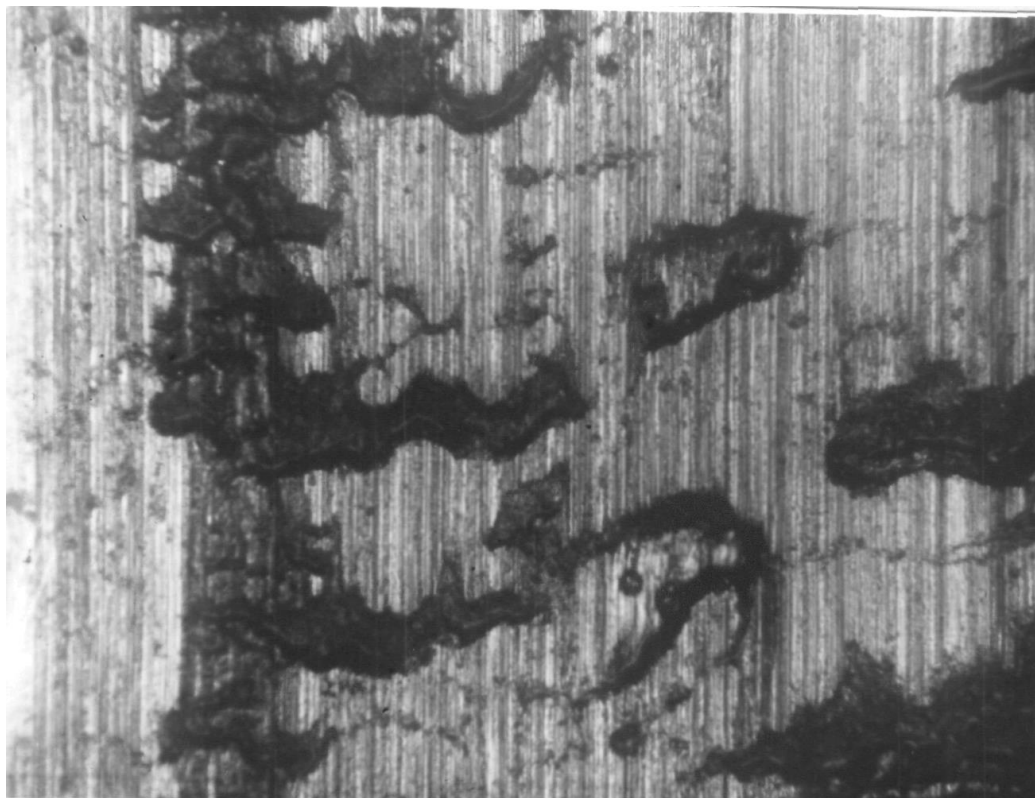
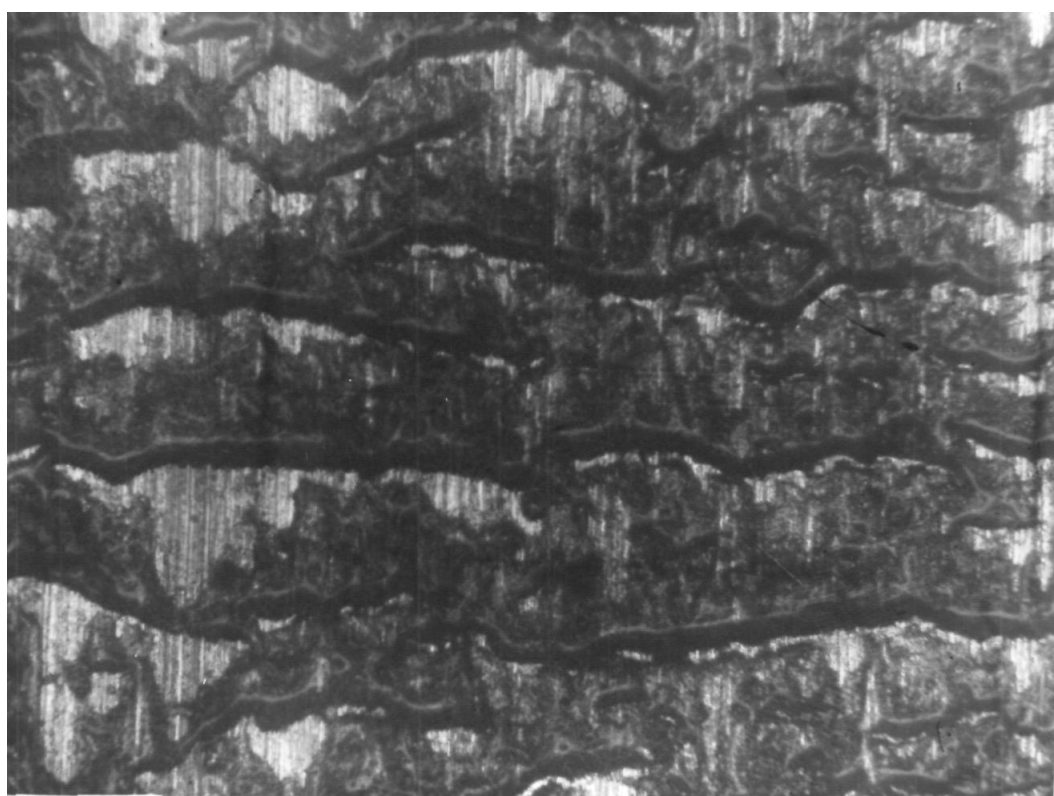
Фізико-механічні властивості високопластичних сталей викликають у процесі звичайного різання інтенсивне наростоутворення (рис. 1.2), більшу усадку стружки схоплювання й інші несприятливі явища, що призводять до заклинювання стружки в стружкових канавках протяжки, погіршенню шорсткості обробленої поверхні (рис. 1.3), зменшенню стійкості ріжучої частини інструмента, а іноді й до розриву протяжки.

У літературі в цей час відсутня докладна інформація по обробці сталей цього класу ріжучим протягуванням, хоча деталі великих довжин і діаметрів, виготовлені з таких сталей, знаходять широке застосування в ряді галузей машинобудування.

*a**б*

($\times 450$; $\gamma = 15^\circ$; $\alpha = 3^\circ$; $a = 0,04$ мм; ЗОР – сульфифрезол; $V = 0,083$ м/с)

Рис. 1.2. Мікрофотографії кореню стружки (а) та обробленої поверхні (б), отриманих при різанні високопластичної сталі 10ГН.

*a**б*

($\times 50$; $\gamma = 15^\circ$; $\alpha = 3^\circ$; $a = 0,08$ мм; ЗОР – сульфозфрезол; $V = 0,083$ м/с)

Рис. 1.3. Мікрофотографії обробленої поверхні сталі 10ГН при нормальному різанні (*a*) та в момент заклинювання (*б*)

При ріжучому протягуванні відношення ширини зрізу до товщини велике, тому процес різання можна розглядати як плоску деформацію без розширення стружки, що, згідно [17] є простим зсувом. Характеристикою ступеня деформації при різання є відносний зсув q . Згідно Бриксу А.А. [31] він дорівнює:

$$q = \operatorname{ctg} \varphi + \operatorname{tg}(\varphi + \gamma), \quad (1.7)$$

де φ – кут, що визначає положення площини зсуву.

Ступінь деформації металу, що зрізується, при його перетворенні в стружку, інтенсивність тертя й захоплювання на поверхнях контакту, рівень силових і теплових навантажень і деяких інших факторів у сукупності визначають оброблюваність того або іншого матеріалу. При цьому висока інтенсивність протікання названих явищ свідчить про його низьку оброблюваність, з формули (1.7) виходить, що ступінь деформації при різанні визначається кутами φ и γ .

Природно припускати, що створюючи мінімум сили стружкоутворення, тобто наближаючи $\frac{dR}{d\varphi} = 0$, можливо тим самим зменшити напружено-деформований стан зони стружкоутворення.

Показником, що найбільш повно ілюструє взаємодію всіх явищ у процесі різання є кут φ , що характеризує середній напрямок зсувів у зоні стружкоутворення. Знаючи кут φ в і передній кут, можна визначити усадку стружки, напрямок і величину головних деформацій, а також ряд інших характеристик процесу різання, з якими взаємозалежний кут φ .

Таким чином, кут φ можна вважати найважливішим критерієм оброблюваності матеріалу. При цьому збільшення φ , що свідчать про зниження напруженості процесу різання, показує, що оброблюваність поліпшується, і навпаки. Згідно Зореву Н.Н. [31] величина кута φ безпосередньо залежить від переднього кута інструмента, властивостей оброблюваного матеріалу й кута дії. Рівняння, виведене Зоревим Н.Н. для визначення кута φ , має вигляд:

$$\operatorname{ctg} \sqrt[4]{A} \cdot \varphi_K - \operatorname{tg}(\sqrt[4]{A} \cdot \varphi + \omega) = \operatorname{ctg} \varphi_K - \operatorname{tg}(\varphi_K - \gamma), \quad (1.8)$$

де φ_K – кут між кінцевою межею зони стружкоутворення й площиною різання;

A – опір оброблюваного металу зсуву при відносному зсуві, дорівнює 2.5;

ω – кут дії;

γ – переділи кут інструменту.

При переході від малих швидкостей різання до більших починає проявлятися дія четвертого фактора – швидкості різання. Розглянемо, якими з перерахованих факторів доцільно управляти при протягуванні, для того щоб збільшити кут φ , а отже, поліпшити оброблюваність в'язкого матеріалу.

Протягування здійснюється в порівняно вузькому діапазоні швидкостей різання (зазвичай – 0,05-0,15 м/с, рідше 0,01-0,3 м/с), де їхня зміна істотно не впливає на процес стружкоутворення. Отже, змінюючи швидкість різання практично не можна поліпшити оброблюваність матеріалів при протягуванні.

При збільшенні опору зсуву в зоні стружкоутворення застосуванням пластичної деформації оброблюваного металу, кут φ зростає зі зменшенням деформації й усадки стружки [31]. Одним з методів, що дозволяють підвищити опір зсуву на початковій межі пластичної зони, є попереднє холодне деформування [10, 13, 20, 25, 27, 35, 36,]. Вплив механічних властивостей оброблюваного матеріалу на процес різання полягає в наступному: при підвищенні опору зсуву τ_s , в площині зсуву цього матеріалу відбувається звуження зони стружкоутворення і її поворот за годинниковою стрілкою, тобто відбувається збільшення кута від φ_1 до φ_2 . Крім того, підвищення τ_s знижує коефіцієнт тертя μ на передній поверхні й інтенсивність наростоутворення. Зниження інтенсивності наростоутворення повинне знижувати оброблюваність, тому що зі зменшенням величини тіла наросту зменшується дійсний передній кут. Незважаючи на цю обставину, сумарну дію підвищення міцнісних характеристик даного матеріалу на його оброблюваність досить істотно і є позитивним. Кут φ пов'язаний з усадкою стружки залежністю Тіме І.А. [31]:

$$\xi = \frac{\cos(\varphi - \gamma)}{\sin \varphi}. \quad (1.9)$$

Видно, що збільшення кута φ приведе до зниження усадки стружки. Це у свою чергу викличе зменшення довжини контакту C стружки з передньою поверхнею, тому що між усадкою й довжиною контакту існує однозначний зв'язок [9]:

$$C_1 = a[\xi(1 + \operatorname{tg} \gamma) + \sec \gamma], \quad (1.10)$$

де C_1 – довжина застійної зони, складає біля половини від всієї довжини контакту [26, 31].

Зменшення довжини контакту приведе до зростання середнього контактного тиску [35] і, як наслідок, до зменшення середнього коефіцієнта тертя μ на передній поверхні, що визначається як:

$$\mu = \frac{q_F}{q_N}. \quad (1.11)$$

Зниження коефіцієнта тертя μ приведе до зменшення кута дії ω у силу існування залежності:

$$\omega = \eta - \gamma, \quad (1.12)$$

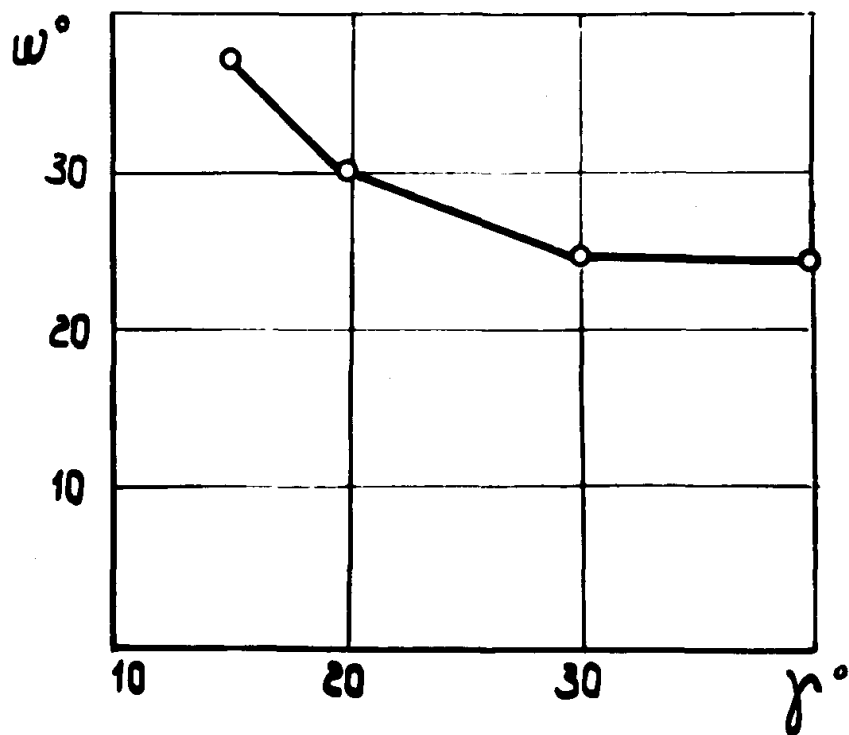
де: $\eta = \arctg \mu$, μ – кут тертя.

Зміна кута дії ω впливає на кут ϕ тому що сума цих кутів постійна й приблизно дорівнює $\pi/4$ [4]. Звідси виходить, що зменшення коефіцієнта тертя по передній поверхні сприяє збільшенню кута ϕ . Зменшення коефіцієнта тертя μ можна робити за рахунок правильного підбора ЗОР [10, 13, 28] (рис. 1.5), зменшення шорсткості передньої поверхні різця, застосовуючи попередню термомеханічну обробку, так, наприклад, підігрівання заготовки її холодне пластичне деформування.

Збільшення переднього кута γ , що визначає напрямок сходу стружки викликає збільшення кута ϕ , а отже, безпосередньо впливає на оброблюваність, тому що з ростом переднього кута зменшується деформація оброблюваного матеріалу за рахунок зміни напрямку тиску оброблюваного матеріалу в результаті зрушень у зоні стружкоутворення.

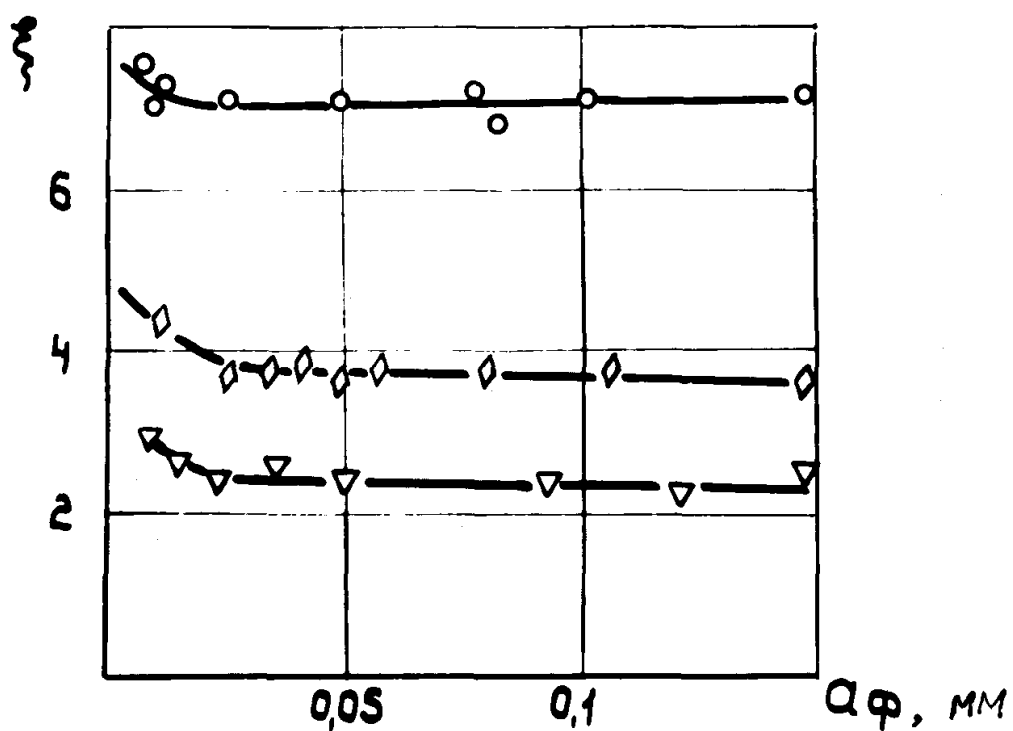
Непрямий вплив переднього кута на оброблюваність полягає в зміні кута дії ω , що визначає напрямок рівнодіючої R на передній поверхні інструмента (рис. 1.4). Це виходить із залежності (1.12). Кут тертя ϕ на передній поверхні при збільшенні γ , теж зростає через падіння питомих нормальних навантажень, у підсумку ω навіть при значному збільшенні γ змінюється мало. Звідси виходить, що зміна переднього кута впливає на кут ϕ . Збільшуючи γ , можна значно підвищити оброблюваність при протягуванні.

Таким чином, аналіз літературних джерел показує, що існує ряд факторів, що істотно впливають на кут ϕ який може виступати як найбільш важливий критерій оброблюваності в'язких сталей.



(Сталь 10ГН; $V = 0,083$ м/с; $\gamma = 15^\circ$; $\alpha = 3^\circ$; ЗОР – сульфозфрезол)

Рис. 1.4. Залежність кута дії ω від переднього кута γ



○ – 5 % розчин емульсола; ◇ – сульфозфрезол; ▽ – рідина МР-4

($V = 0,083$ м/с; $\gamma = 15^\circ$; $\alpha = 3^\circ$, Сталь 10ГН)

Рис. 1.5. Залежність усадки стружки ξ від товщини зрізу a

1.3. Аналіз жорсткості різального інструмента

З літературних джерел [11, 15, 19] відомо, що недостатня жорсткість різального інструменту й обладнання може привести до підвищення шорсткості обробленої поверхні, зростання сил різання, усадки стружки, зменшенню стійкості інструмента й точності обробленого отвору.

Так, автор [33] відзначає періодичну зміну сумарного перетину зрізу в результаті послідовного чергування входів і виходів ріжучих зубів в оброблювану деталь. Від змінності сили різання у верстаті виникають коливання, які впливають на стійкість різального інструменту й точність обробленого виробу. Автори [1] відзначають зміну умові різання при відносній коливанні інструмента й деталі по їхній осі, що приводить до зміни як дійсної геометрії, так і товщини зрізу. Відповідно до його даного при статичному задньому куті 3° , його дійсне значення, при глибині вібраційного сліду $34 \text{ мкм} - 3^\circ 10'$. На його думку збільшення жорсткості технологічної системи верстата, підвищення швидкості різання, зниження рівня коливань, збільшення заднього кута повинне сприятливо позначатися на стійкості різального інструменту.

Використовуючи схему комбінованого протягування [7, 19, 20, 21, 24, 35] і конструкції протяжок із ріжучими зубами зі зміщеним кроком [15] можна значно зменшити виникаючі при обробці коливання як в осьовому, так і радіальному напрямку. У роботах [11, 39] встановлено, що після обробки отворів круглими протяжками має місце розсіювання діаметральних розміром і різні похибки обробленої поверхні. На думку автора [39] однієї із причин, що викликає ці похибки, є пружні деформації зуба протяжки при дії на нього осьових сил різання, що буде приводити не тільки до збільшення поля розсіювання розмірів, але й до зміни умов різання й, як наслідок, до зміни стійкості інструмента.

Пружні деформації зуба протяжки як у радіальному, так і ж осьовому напрямку досліджувалися в роботі [11]. У роботі [11] автори пропонують теоретичну формулу для визначення амплітуди коливанні різального інструменту (протяжки) у процесі протягування. На їхню думку форма й частота коливань

залежить від жорсткості зуба протяжки, зміни товщини зрізувального шару, величини й напрямки сили R , сили тертя по задній поверхні зуба, наростоутворення, виду ЗОР і способів її подачі в зону різання. В основу розрахунку була взята методика, основним допущенням у розрахунку якої є те, що величина осьових прогинів досить незначна в порівнянні з товщиною пластини.

Розрахункова схема представлена на рис. 1.6. Виходячи з розрахункової схеми й пропонованих у роботі таблиць очевидно, що жорсткість зуба протяжки буде збільшуватися при зменшенні відношення

$$K = \frac{d_n - d_e}{2 \cdot S_z}, \quad (1.13)$$

де S_z – середня товщина зуба в осьовому перерізі.

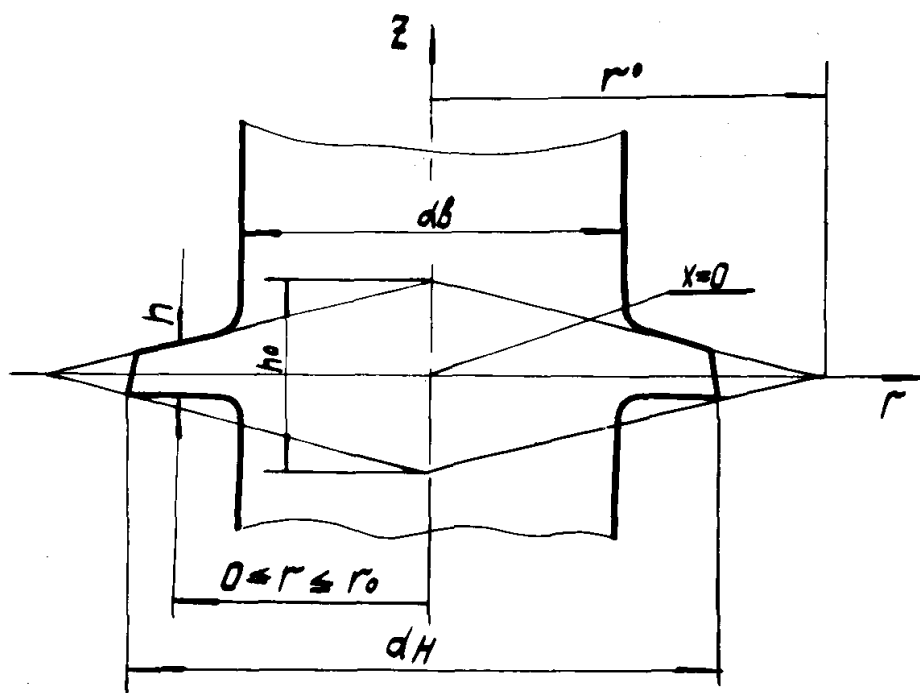


Рис. 1.6. Схема розрахунку частоти власних коливань зуба круглої протяжки

При достатній жорсткості тіла зуба й більших передніх кутів на ріжучих елементах (до 40°) встає питання про можливу втрату жорсткості ріжучим клином у радіальному напрямку. У цьому випадку, пропонований у роботі [11] метод

визначення жорсткості ріжучого зуба непридатний, тому що слабким місцем системи виявляється не ріжучий зуб, а ріжучий клин.

Автор [11], досліджуючи пружні деформації оброблюваної заготовки й ріжучого зуба і їхній вплив на фактичну товщину зрізу, пропонують формулу для розрахунку радіальних пружних деформацій і методи їхнього виміру за розрахунковою схемою, запропонованої в роботі [11], указуючи, що співвідношення між фактичною товщиною зрізу й розрахункової залежить від жорсткості заготовки й ріжучого зуба протяжки.

Аналізуючи роботи про жорсткість технологічної системи верстата й елементів різального інструменту, необхідно відзначити, що в літературі відсутні дані про жорсткість ріжучого клина зуба протяжки, хоча при збільшенні переднього кута до значень 30-40° постає питання про можливу втрату жорсткості ріжучим кліпом, що може привести до виникнення вібрацій ріжучого клина й, як наслідок, до погіршення шорсткості й зменшенню точності обробленого виробу, зростання сил різання й зниженню стійкості різального інструменту. Формули розрахунку жорсткості зуба протяжки, пропоновані автором [11] для опису даного випадку непридатні, тому що у своїх роботах автори досліджують жорсткість ріжучого зуба (при значенні коефіцієнта $K < 3$), а не ріжучого клина при достатній ($K > 3$) жорсткості зуба. Створення нових розрахункових формул, що дозволяють визначати пружні переміщення ріжучого клина в процесі різання дозволять створити нові методики з розрахунку й проектуванню протяжного інструменту із більшими передніми кутами.

1.4. Стійкість різального інструменту при протягуванні

Відомо [3, 5, 10, 14, 18, 30, 31, 35], що найбільший вплив на стійкість протяжного інструмента мають такі параметри, як швидкість різання (V , м/с), товщина зрізу (a , мм), геометрія інструмента (γ і α), вид ЗОР. Авторами [10] був досліджений вплив ЗОР на характеристики процесу різання. Виходячи із цього, можна припустити, що й на стійкість різального інструменту ЗОР буде також впливати, як і на усадку стружки й сили різання, тому що робота відбувається на швидкостях, де переважає адгезійне спрацювання. Автори [3, 6, 7, 18, 29, 32, 35]

відзначають крім цього вплив на стійкість інструмента фізико-механічних властивостей інструментального й оброблюваного матеріалу, способу подачі ЗОР. Відзначається особливо, що правильний підбір геометрії інструмента не тільки буде сприяти процесу стружкоутворення, але й вплине на підвищення стійкості інструмента.

Для обробки маловуглецевих конструкційних сталей автори [5, 6, 39] рекомендують приймати передній кут γ межах 10-20°, відзначаючи однак, що збільшення переднього кута позитивно позначається на процесі різання. Однак чому верхні значення переднього кута повинні обмежуватися 20°, автори не уточнюють. У роботі [18] для обробки загартованої сталі пропонується формула для визначення переднього кута, величину якого він ставить у залежність від твердості оброблюваного матеріалу:

$$\gamma = (18^\circ - 0,7HRC),^\circ. \quad (1.14)$$

У деяких роботах [31, 29] рекомендується збільшувати передній кут до 25°. Автор [29] відзначає, що при обробці сталей збільшення переднього кута до 25° поліпшує оброблюваність, зменшує зношування по передній поверхні але збільшується зношування по задній поверхні, внаслідок ослаблення ріжучої кромки. Оптимальний передній кут, на їхню думку дорівнює 20°. Автор роботи [11], досліджуючи колювання зубів круглої протяжки, при передньому куті 25° спостерігав вібрації.

У роботі [39], при обробці сталей у складеному стані, передній кут змінювався в межах від 10 до 30°. При цьому було зафіксоване зменшення усадки стружки від 2,3 до 1,85, однак відзначене збільшення діаметра завитка стружки до 20%. Тому для обробки в'язких і високопластичних матеріалів (сталі, зі змістом вуглецю до 0,3%, леговані нікелем, кремнієм, молібденом, марганцем і ін.) автор рекомендує передній кут до 20° відзначаючи, що визначальної при конструюванні протяжного інструмента є глибина стружкової канавки, коли як вказані сталі складно завиваються в завиток навіть при товщині зрізу 0,04 мм.

Висловлення автора [39] про збільшення діаметра завитка при збільшенні переднього кута суперечать роботі [17, 35]. Визначальної для діаметра завитка [10, 29, 35] є товщина зрізу, усадка стружки, коефіцієнт тертя по передній

поверхні інструмента. За інших рівних умов збільшення переднього кута приводить до зменшення усадки стружки, отже, і діаметра завитка.

Автори роботи [14] при обробці важкооброблюваних матеріалів рекомендує передній кут 30° , з додатковою фаскою з переднім кутом 0° . При цьому відзначається поліпшення характеристик оброблюваності, поліпшення стружкозавивання, підвищення стійкості. Цю точку зору підтримують і автори роботи [41], які спостерігали при цьому ще й підвищення стійкості інструмента до 7 разів.

Аналізуючи всі перераховані вище роботи, можна незважаючи на різні точки зору, відзначити, що збільшення переднього кута до $25-30^\circ$ поліпшує характеристики процесу різання. Значення передніх кутів $15-20^\circ$ рекомендуються для ріжучих протяжок, знайшло широке застосування виходячи з технологічних міркувань, тому що заточити протяжне інструмент із переднім вугіллям більше 20° складно. Що стосується роботи [41], те важко сказати, наскільки правомірне твердження авторів про те, що характеристики руйнування матеріалу у процесі обробки різанням ті ж, що й характеристики руйнування зразка в зоні конуса розриву при випробуванні на розтягання. Зайва робота в процесі руйнування це тепло й деформація структури металу, які знижують твердість, а ефективний передній кут – це мінімальні кут, при якому досягається максимальна твердість стружки. Результати, отримані авторами [41], вражають, але передумови, на підставі яких вони будують свої розрахунки, сумнівні й суперечать роботам [18, 31, 35]. Що стосується заднього кута α , та ряд авторів рекомендують його приймати в межах $5-10^\circ$ [29, 39], відзначаючи, що стійкість протяжок, виражена в сумарній довжині протяжки, при певній ширині зони стирання по задніх гранях, збільшується зі збільшенням заднього кута, при цьому меншій товщині зрізу відповідають більші величини задніх кутів. Наприклад, максимальна стійкість для товщини зрізу $a = 0,02 \text{ мм}$ спостерігається при $\alpha = 10^\circ$, при $a = 0,04 \text{ мм}$ – $\alpha = 8^\circ$, при $a = 0,06 \text{ мм}$ – $\alpha = 5^\circ$ [39].

Автори [3, 5, 30], взявши за критерій максимальну сумарну стійкість протяжок, рекомендує застосовувати протяжки з задніми кутами $\alpha = 3^\circ$ для чорнових і $\alpha = 1-2^\circ$ для чистових і калібрувальних зубів.

Пронкин Н.Ф. [29] при обробці важкооброблюваних матеріалів вважає оптимальним задній кут $\alpha = 8^\circ$.

Автори [18] вважають, що зміна задніх кутів у межах $4-12^\circ$ не відбивається на стійкості інструмента.

Відповідно до розрахунків але методики, викладеної в роботі [41], значення оптимальних задніх кутів можуть досягати 22° . Як бачимо й величина задніх кутів за даними різних авторів різна й немає загальноприйнятої думки на цей рахунок. Таким чином, у літературних джерелах недостатньо освітлені питання стійкості різального інструменту при передніх кутах понад 20° .

Визначення стійкості інструмента при роботі зі зміцненого металу. Обробка отворів за схемою: чорнове деформуюче протягування – чистове різання – особливо ефективне в тих випадках, коли для виготовлення деталей використовуються заготовки, що мають неточний отвір і дефекти в поверхневому шарі металу. Деформуюче протягування [3, 4, 35] у десятки разів (від 1-5 до 0,05-0,1 мм) знижує вихідну некруглість й нециліндричність отвору "чорнкової заготовки" (рис. 1.7), що дозволяє значно зменшити припуск під подальшу обробку отвору різальним інструментом, що у такому випадку необхідна для видалення дефектного шару металу, отриманого в результаті металургійного циклу виготовлення заготовки. Товщина дефектного шару залежно від способу одержання заготовки і її розмірів може коливатися, як було показано раніше [32] від 0,05 до 0,8 мм.

У процесі деформуючого протягування [37] внаслідок зміцнення оброблюваного металу істотно змінюються його вихідні механічні властивості, а отже, і оброблюваність різанням. Встановлено, що деформуюче протягування поліпшує оброблюваність всіх матеріалів. Особливо це позначається при обробці в'язких і високопластичних матеріалів типу сталей 10, 20, 20Г.

Встановлено [27], що вплив попереднього зміцнення на стійкість у діапазоні швидкостей 1-6,5 м/с може бути двояким і залежить від природи спрацювання інструмента. У зоні досягнення адгезійного спрацювання (протягування, розточування на низьких швидкостях різання) стійкість інструмента дещо знижується (на 10-25%) при збільшенні ступеня зміцнення оброблюваної деталі, а в зоні дії дифузійного спрацювання (обробка на високих швидкостях різання) вона підвищується на 20-100%.

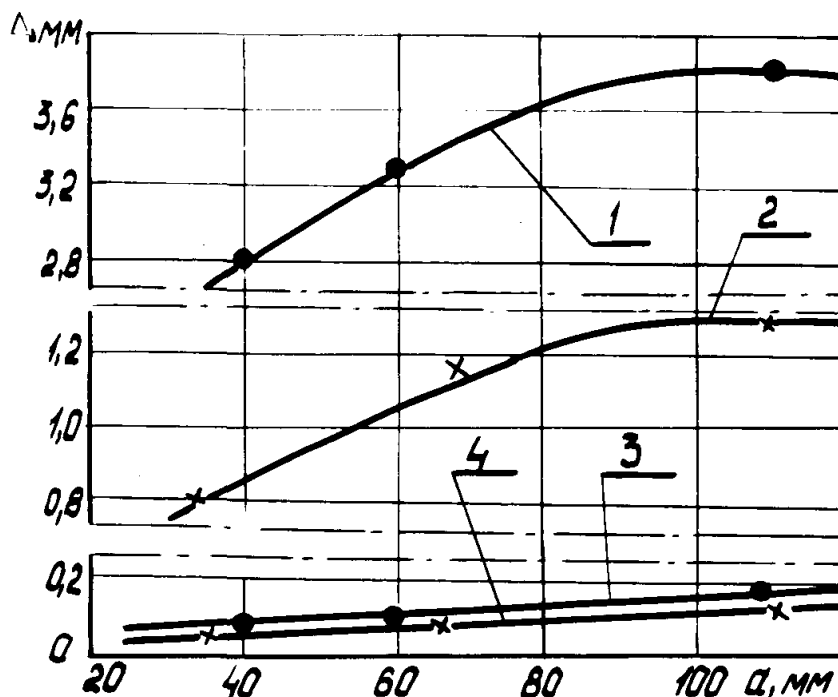


Рис. 1.7. Експериментальні залежності: овальність гарячекатаних труб (криві 1, 3) та холоднокатаних труб (криві 2, 4) від номінального діаметру їх отвору (криві 1, 2 у вихідному стані, криві 3, 4 після деформуючого протягування з деформацією 5-7 % від діаметра)

Берлинер М.С. [2] відзначав, що стійкість зубів, що працюють по металу, зміцненому попередніми зубами, зазвичай нижче стійкості перших зубів, що зрізують незміцнений метал (за інших рівних умов).

Резников Н.И. [33] вважає, що в міру зменшення усадки стружки (що має місце при обробці зміцненого металу) інтенсивність спрацювання інструмента зростає внаслідок підвищення контактних тисків.

Автори [7, 25] відзначають, що при різанні зміцненого матеріалу (22 – зміцнення деформуючим протягуванням, 29 – накатним роликом) стійкість інструменту зростає в 2-6 рази.

Недоліком роботи [7] є неоднакові умови, у яких працювали порівнювані протягування. Загальний припуск у протяжки, що працює по зміцненому матеріалу, становить 0,17 мм, у працюючої по незміцненому шарі – 1 мм. Крім того, перша протяжка працювала по знеуглецьованому шарі, що дорівнює 0,3-0,4 мм, а друга по ливарній кірці.

Значне підвищення стійкості інструмента, відзначене в роботі [25] пов'язане з тим, що, по-перше, поверхневий шар металу, при цьому методі обробки зміцнюється настільки, що повністю вичерпується його пластичність і з'являються мікротріщини, а, по-друге, тим, що накатної ролик грав при обробці роль додаткового супорта, значно підвищуючи жорсткість технологічної системи верстата.

Процес різального протягування, так і деформуючого, здійснюється на швидкостях, коли спрацювання інструмента визначається адгезією, а адгезійне спрацювання залежить насамперед від хімічної спорідненості структур оброблюваного й обробного матеріалу й співвідношення механічних характеристик тертьових пар, тобто їхньою твердістю. Згідно [18] збільшення твердості оброблюваного матеріалу, за інших рівних умов, приводить до зменшення стійкості різального інструменту.

Виходячи із цього, стійкість інструмента, що обробляє зміцнений матеріал у діапазоні швидкостей протягування (до 0,5 м/с) повинна зменшуватися при збільшенні твердості оброблюваного матеріалу. Це твердження узгоджується з роботами [18, 31] і існуючими уявленнями про природу й характер спрацювання.

Відомо [27, 35], що стійкість інструмента залежить від твердості оброблюваного матеріалу за інших рівних умов. При цьому твердість впливає на стійкість по-різному. При зміцненні термообробкою стійкість знижується, при холодному зміцненні вона може як підвищуватися, так і знижуватися. Ряд деталей машин за своїм експлуатаційним призначенням вимагає підвищеної твердості поверхні деталі й в'язкої серцевини. Найчастіше на чистових операціях на стійкість інструмента впливає глибина зміцненого шару від попередньої обробки, тому що вона співставима з величиною зрізного шару [2, 20]. Тому визначення стійкості інструмента, що працює по металу змінної твердості, є важливим практичним завданням [27, 35].

Автори [27, 35] пропонують визначити стійкість інструмента при проведенні повних стійкісних випробувань $T = f(V)$ на циліндричних зразках, зміцнених до різної твердості одноосьовим стисканням. Мікротвердість зразків при цьому повинна бути по всьому перетину сталою. Зразки обробляються з поздовжньою

подачею й вимірюють спрацювання інструмента в процесі обробки. Даний спосіб визначення стійкості різального інструменту розроблений для металів зміцнених холодною деформацією. При цьому прийняте допущення, що вид попередньої деформації не здійснює самостійного впливу на стійкість. Цей спосіб придатний і для випадку дослідження впливу термообробки на стійкість, за умови рівності твердості по перетину. Недоліком цього способу є, насамперед, неможливість визначення стійкості експрес-методом. Існуючі експрес-методи визначення стійкості різального інструменту [12, 31, 33], як правило, не вирішують поставленого завдання. Для їхнього здійснення також необхідно готувати зміцнені зразки. Необхідно також відзначити, що одноосьовим стисканням важко здійснити деформацію понад 200 %, що мають місце в текстурному шарі після деформуючого протягування.

Важливим також є завдання моніторингу зміни спрацювання інструменту при протягуванні в процесі роботи, для своєчасного запобігання виходу з ладу інструменту. Цьому присвячені роботи авторів [40, 42].

Аналізуючи роботи, присвячені питанню стійкості різального інструменту [6, 18, 20], можна зробити висновок, що загальний недолік цих робіт полягає в тому, що питання спрацювання й стійкості розглянуті в них стосовно до протяжок, що мають порівняно вузький діапазон зміни передніх ($10-15^\circ$) і задніх ($1-4^\circ$) кутів інструмента. Раніше було доведено [27], що збільшення переднього кута до $30-40^\circ$ залежно від товщини зрізу, впливає на характеристики процесу різання; зменшується усадка стружки й сили різання, знижується температура різання й шорсткість обробленої поверхні, знижується інтенсивність наростуутворення. Було б природним припустити, що такі значні зміни характеристик процесу різання повинні сприятливо позначитися на стійкості ріжучої частини протяжки.

1.5. Висновки, мета та задачі дослідження

На підставі проведеного огляду літературних джерел та відомих досліджень можна зробити наступні висновки. Вирішення питання про вибір раціональної з точки зору стійкості, геометрії інструмента, при широкому діапазоні зміни передніх і задніх кутів є актуальним. Особливий інтерес представляє й створення методики визначення стійкості інструмента при обробці матеріалу з різною твердістю по товщині, що утворилась при попередньому зміцненні обробного матеріалу деформуванням.

Метою роботи є покращення оброблюваності високопластичних матеріалів шляхом вибору раціональних параметрів процесу різання при внутрішньому протягуванні при забезпеченні необхідних параметрів стійкості інструменту.

Для досягнення поставленої у даній роботі мети необхідно вирішити наступні **задачі**:

1. Вивчення та аналіз результатів попередніх досліджень процесу протягування пластичних матеріалів;
2. Визначення впливу основних факторів процесу різання на оброблюваність при протягуванні високопластичних матеріалів;
3. Дослідження взаємозв'язку явищ при обробці протягуванням високопластичних сталей;
4. Вивчення впливу основних факторів процесу різання при протягуванні високопластичних матеріалів на стійкість інструменту протяжки;
5. Розробка рекомендацій для процесів протягування високопластичних сталей.

Об'єкт дослідження – операція внутрішнього протягування високопластичних сталей у незміцненому та попередньо зміцненому станах.

Предмет дослідження – оброблюваність високопластичних сталей при різанні на операціях внутрішнього протягування.

Наукова новизна:

- визначено кут, який визначає положення площини зсуву при протягуванні, у якості критерію оброблюваності високопластичних матеріалів при внутрішньому протягуванні;

– визначена залежність стійкості різального інструменту при внутрішньому протягуванні вископластичних матеріалів та діаметра завитка стружки від характеристики процесу різання.

Практичне значення:

Запропоновано метод управління оброблюваністю високопластичних матеріалів при внутрішньому протягуванні шляхом зміни переднього кута, кута дії та ступеня попереднього зміцнення обробного матеріалу. Розроблені практичні рекомендації проектування конструкцій внутрішніх протяжок для різання попередньо зміцненого матеріалу, що усувають негативний вплив нерівномірної твердості зрізаного шару на стійкість протяжки.

Апробація результатів роботи:

Основні положення роботи були викладені на LVII науково-технічній конференції здобувачів вищої освіти ЦНТУ, що відбулась 20 квітня 2023 року.

2. ВИЗНАЧЕННЯ ВПЛИВУ ОСНОВНИХ ФАКТОРІВ ПРОЦЕСУ РІЗАННЯ НА ОБРОБЛЮВАНІСТЬ ПРИ ПРОТЯГУВАННІ

2.1. Аналіз фізико-механічних властивостей обробного матеріалу

В якості зразків для вивчення впливу параметрів обробки на процес протягування обрані заготовки зі сталі 10ГН прямокутного перерізу (60×25×300) та заготовки у формі труби (135-137×12,5) довжиною 500 мм, а також зі сталей 28СП та 10. Фізико-механічні властивості вказаних сталей наведені у таблиці 2.1.

Таблиця 2.1

Фізико-механічні властивості сталей

Марка сталі	Показник		
	$HV, ГПа$	$\sigma_{вр}, ГПа$	$\delta, \%$
Сталь 10ГН	1,85 – 1,92	0,58	36
Сталь 28СП	2,00 – 2,20	0,82	35
Сталь 10	1,08 – 1,11	0,45	32

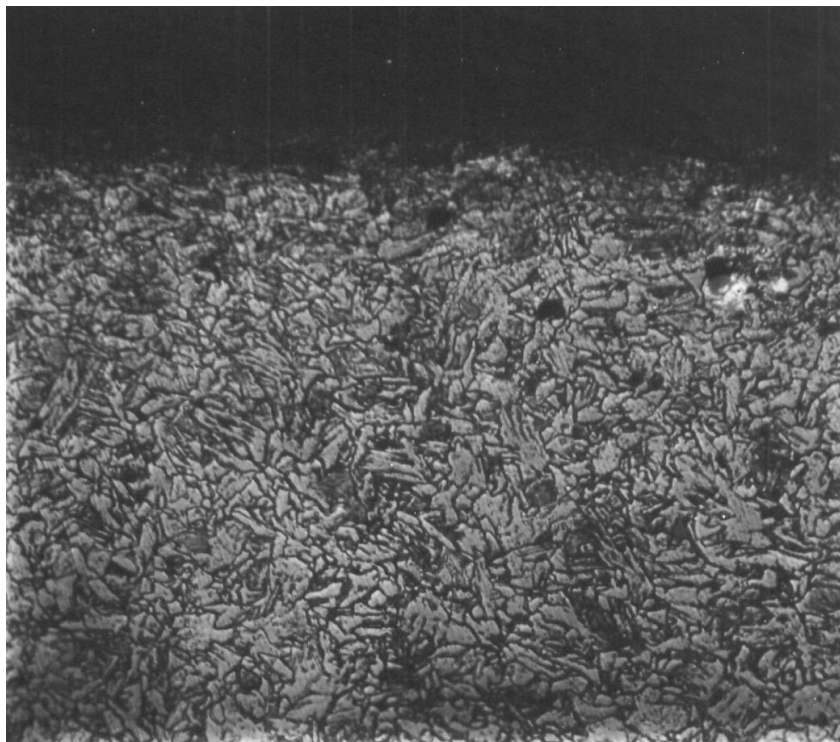
Фізико-механічні властивості прямокутних та трубних зразків подібні.

Мікроструктура досліджуваного металу в незміцненому стані представляє собою феррит-перліт. На рис. 2.1 представлена мікроструктура поверхні (а) і серцевини (б) прямокутних зразків металу, на рис. 2.2 (а, б) мікроструктура різних ділянок поверхневого шару заготовок типу труба, а на рис. 2.2 (в) їхньої серцевини. З наведених мікрофотографій видно, що мікроструктура прямокутних і трубних заготовок відрізняється не суттєво. У таблиці 2.2 наведений хімічний склад сталі 10ГН.

Таблиця 2.2.

Хімічний склад сталі 10ГН у %

C	Al	Mn	Si	Ni	S	Cu	P	Cr
					не більше за			
0,11- 0,15	0,02- 0,07	0,60- 0,90	0,30- 0,50	0,60- 0,90	0,03	0,2	0,25	0,2



a)



б)

Рис. 2.1. Мікроструктура поверхні (*a*) та серцевини (*б*) зразків сталі 10ГН ($\times 70$) у стані постачання

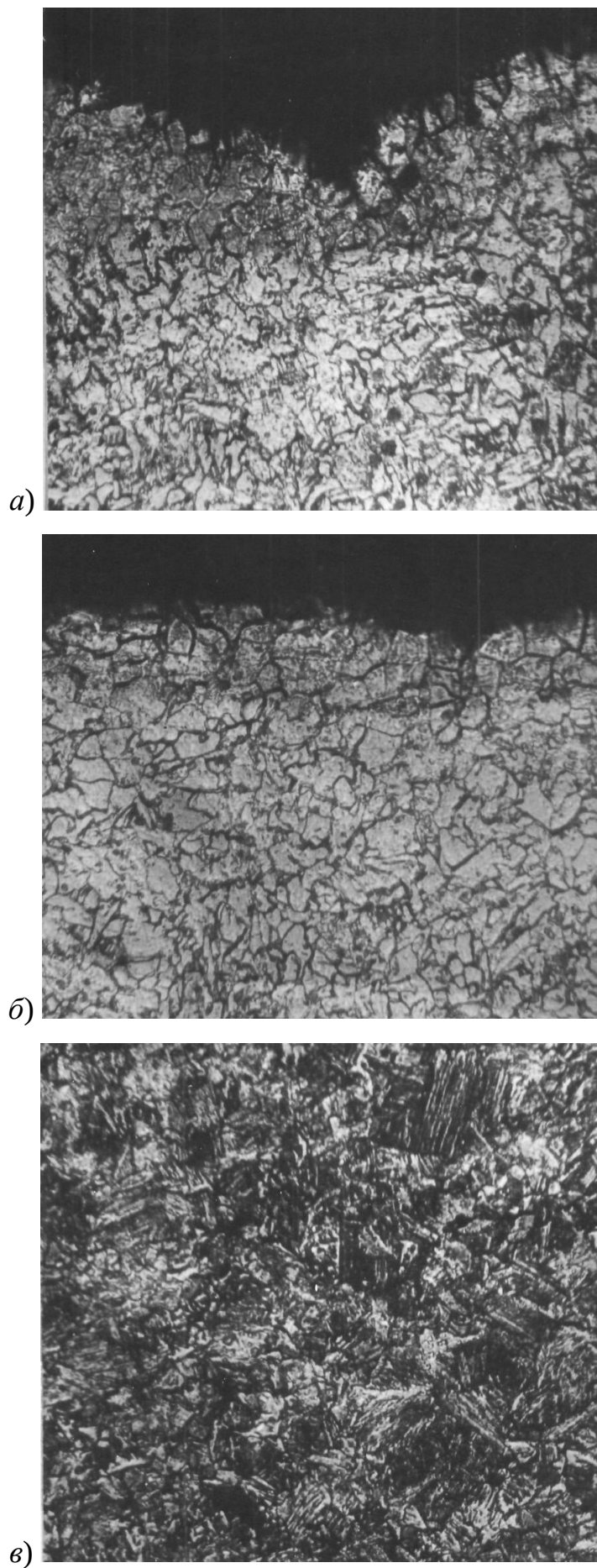


Рис. 2.2. Мікроструктура різних ділянок поверхні (а, б) та серцевини (в) зразків сталі 10ГН ($\times 70$) заготовки типу труба у стані постачання

Через те, що процес протягування можна порівняти з холодним пластичним деформуванням, то сталь 10ГН у стані постачання (після термообробки) для зручності далі будемо вважати незміцненою.

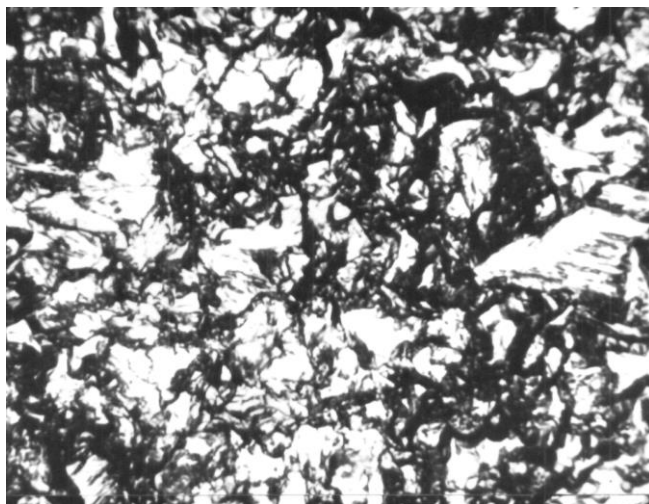
Для визначення оброблюваності сталі в зміцненому стані необхідно проводити попереднє деформуюче протягування заготовок типу труба із великими деформаціями (до 5%), які досягаються трьома різними поєднаннями натягів деформуючих елементів, що складають 0,5 %, 1 % і 1,5%.

Металографічні дослідження [16, 38] зміцненого металу показали, що при використовуваній деформації структура металу не змінюється. Лише в поверхневому шарі спостерігається наступна текстура (рис. 2.3). Проведені дослідження [16, 38] показали, що за допомогою деформуючого протягування неможливо позбутися від деякої частини глибоких раковин металургійного походження. Це видно з рис. 2.4, де показана мікроструктура поверхневого шару з такою раковиною до (а) і після (б, в) деформуючого протягування.

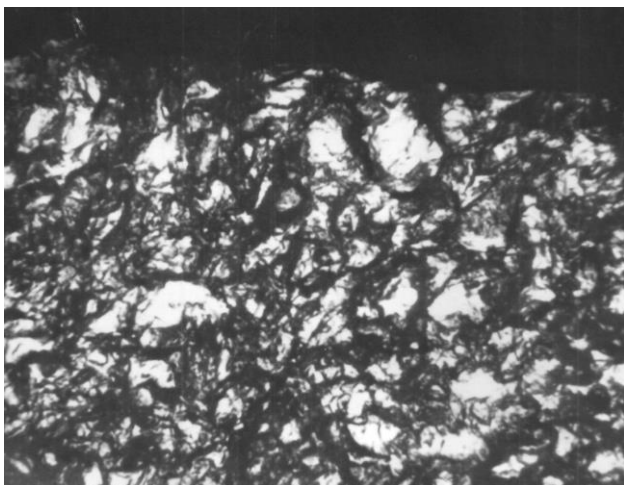
Аналізуючи картину розподілу мікротвердості для зміцненого й незміцненого металу (рис. 2.5), можна відзначити, що зміцнення металу при одній і тій же сумарній деформації по різному залежить від натягу на деформуючий елемент. З рис. 2.5 видно також, що поверхневий шар товщиною 0,02-0,025 мм має знижену мікротвердість у порівнянні з більш глибокими шарами, що, вочевидь, було викликано зміною мікроструктури при виробництві труб.

У якості зразків, для дослідження процесу різання зміцненого металу, що представляють собою кільцевий сектор з довжиною дуги, яка дорівнює 10 мм, брались як частина попередньо деформованої труби по твірній. Довжина зразків становила 250 мм.

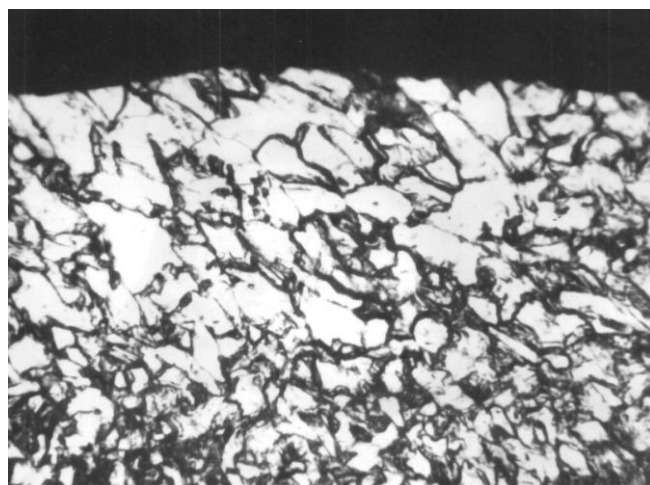
Частина результату була отримана для заготовок із сталі 10 у стані постачання й після холодного зміцнення.



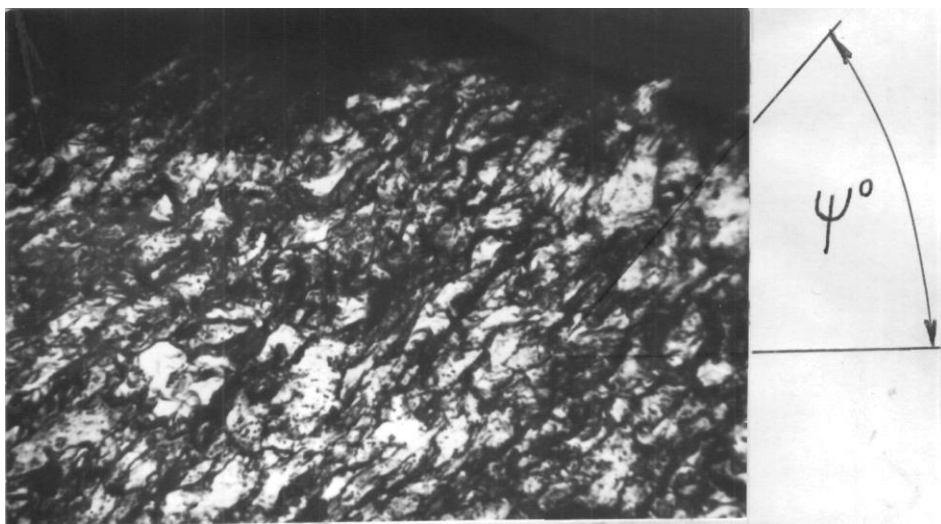
a)



б)



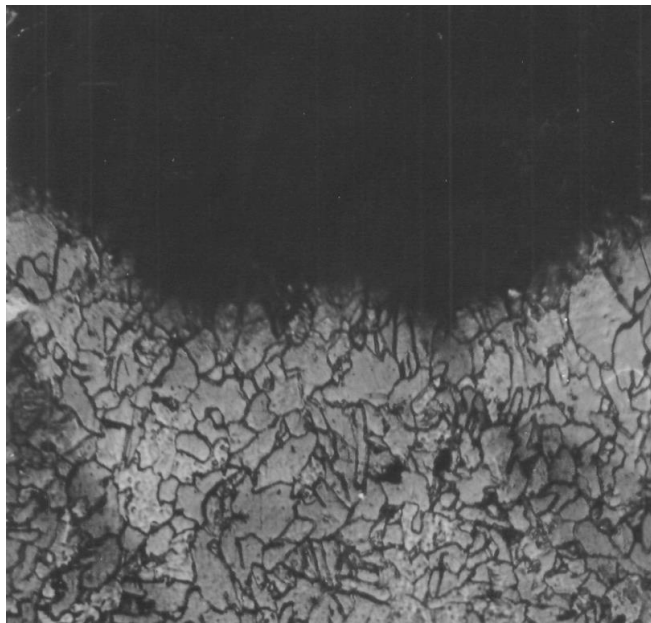
в)



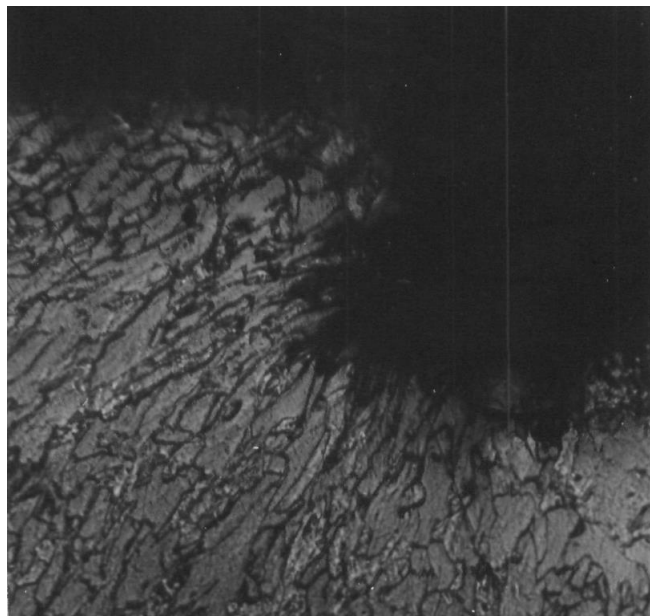
г)

($V = 0,0083 \text{ м/с}$, ЗОР – сульфорезол)

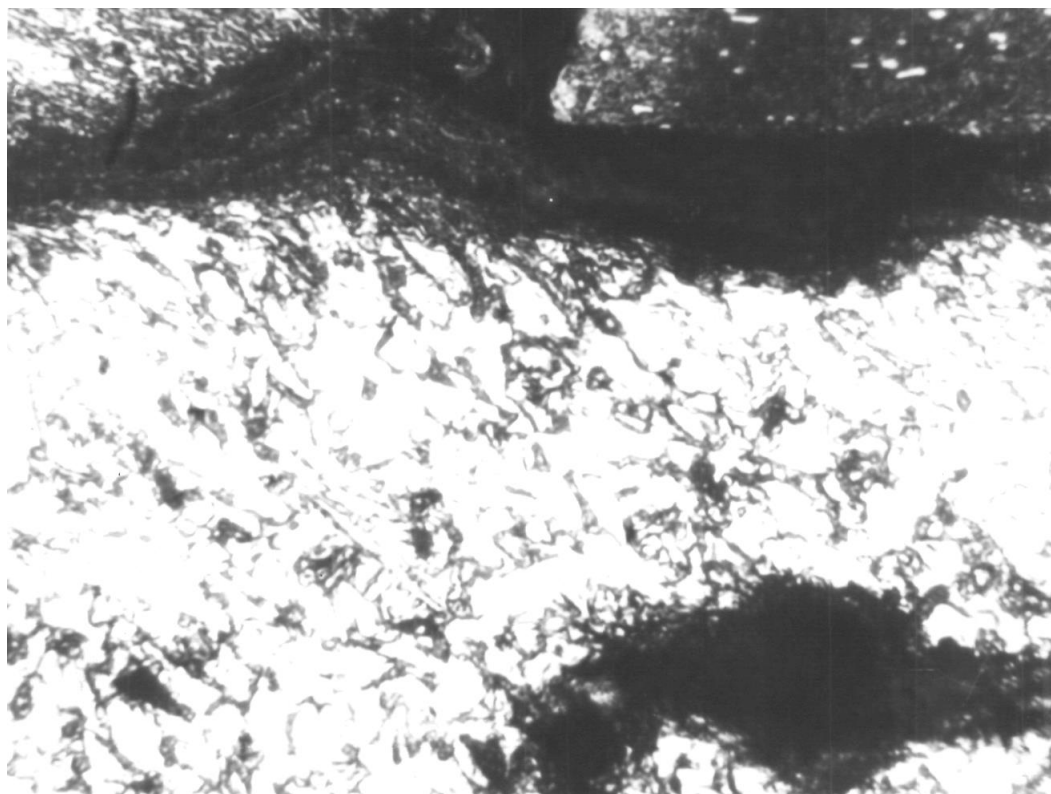
Рис. 2.3. Мікроструктура поверхневого шару сталі 10ГН ($\times 300$) деталі типу труба у вихідному сталі (a) та після деформуючого протягування з сумарною деформацією 5 % : б – $a = 1,5 \text{ мм}$; в – $a = 1,0 \text{ мм}$; г – $a = 0,5 \text{ мм}$



а)



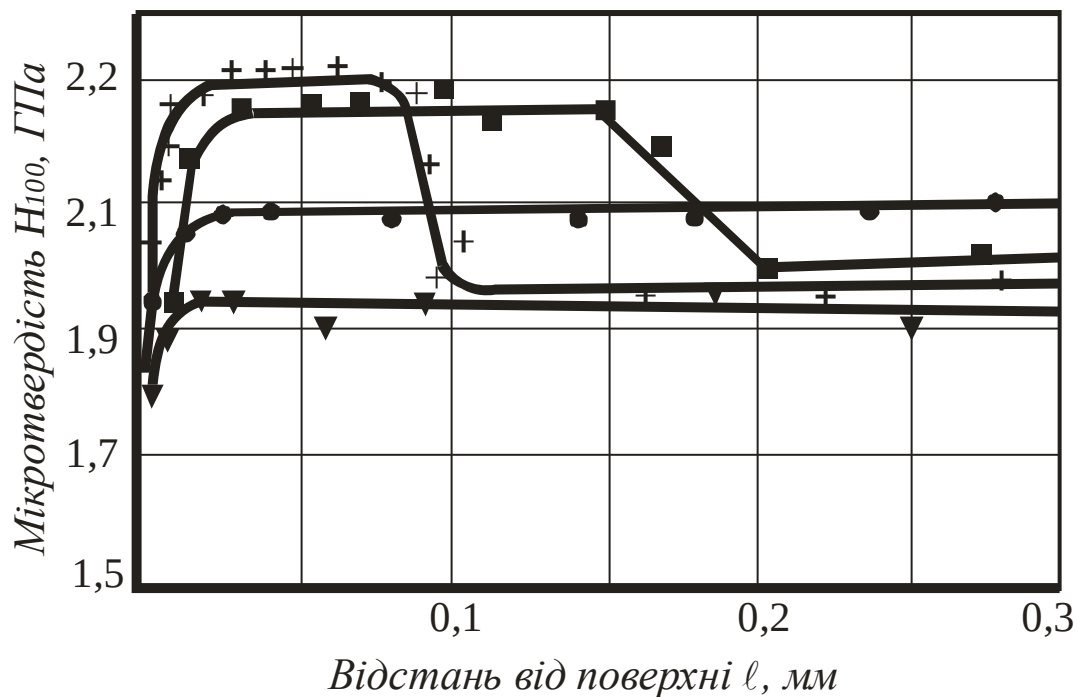
б)



в)

($V = 0,0083$ м/с, $\Sigma a = 5$ мм, $a = 1$ мм, ЗОР – сульфозрезол)

Рис. 2.4. Мікроструктура поверхневого шару сталі 10ГН ($\times 70$) з глибокою відкритою раковиною металургійного походження до (а) та після (б) деформуючого протягування та закритої раковини (в) після деформуючого протягування



($V = 0,0083$ м/с, ЗОР – сульфозфрезол)

Рис. 2.5. Розподіл мікротвердості за товщиною стінки деталей типу труба зі сталі 10ГН у вхідному стані та після деформуючого протягування з натягами: + – 0,5 мм, ■ – 1 мм, ● – 1,5 мм, ▼ – втулка у вихідному стані, $\Sigma a = 5$ мм

2.2. Методи покращення оброблюваності високопластичних сталей

Перевірка ефективності методів поліпшення оброблюваності високопластичних сталей проводилась для вільного різання сталей 10 і 10ГН. При цьому про ефективність методів поліпшення оброблюваності робили висновки по зменшенню усадки стружки, зміні шорсткості обробленої поверхні, зміні значення сил різання, діаметра завитка стружки, температури різання, довжини контакту стружки з передньою поверхнею різця. Усадка стружки пов'язана з обраним критерієм оброблюваності кутом φ [18, 31] залежністю:

$$\xi \cdot \sin \varphi = \cos(\varphi - \gamma) \quad (2.1)$$

і, отже, при постійному передньому куті може служити показником, що якісно представляє кут φ . Крім того, по зміні усадки стружки [18, 31] можна робити висновок про напружено-деформований стан зони стружкоутворення.

Усадка стружки може слугувати якісним показником оброблюваності, причому її зниження свідчить про поліпшення оброблюваності та навпаки. Шорсткість обробленої поверхні також може служити критерієм оброблюваності причому її підвищення свідчить про погіршенні оброблюваності. Крім цих факторів, для вивчення процесу різання високопластичних сталей вивчалася довжина контакту стружки з передньою поверхнею інструмента, сили й температура різання, поміщуваність стружки в стружковій канавці протягування.

Вплив основних факторів процесу різання на оброблюваність визначався при різних механічних властивостях сталі, змінюваних шляхом холодного пластичного деформування, різних коефіцієнтах тертя, що досягаються за рахунок застосування декількох змащувально-охолоджувальних рідин, зміні переднього кута й швидкості різання.

2.3. Вплив попереднього зміцнення на оброблюваність при різанні

Аналіз коренів стружки [27] показують, що процес різання зміцнених високопластичних сталей характеризуються значно більшими кутами φ та меншими товщинами стружки (рис. 2.6), чим процес різання незміцненої сталі за інших рівних умов.

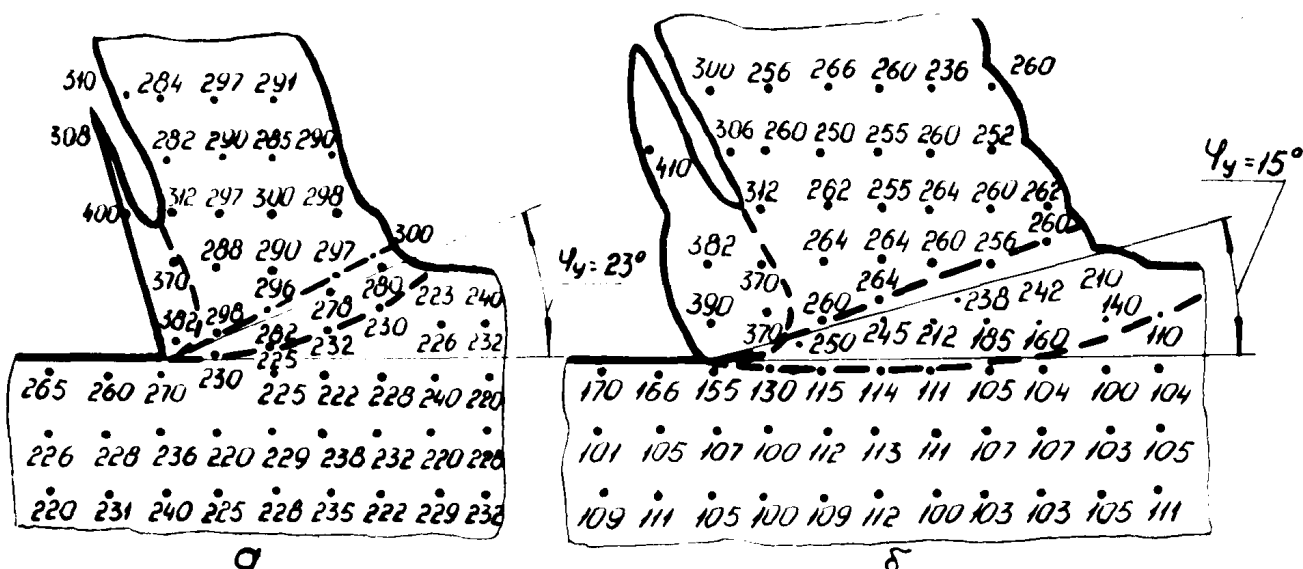
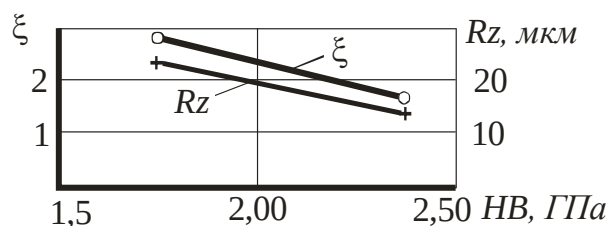


Рис. 2.6. Схема розташування зони стружкоутворення для зміцненої (а) та незміцненої (б) сталі 10

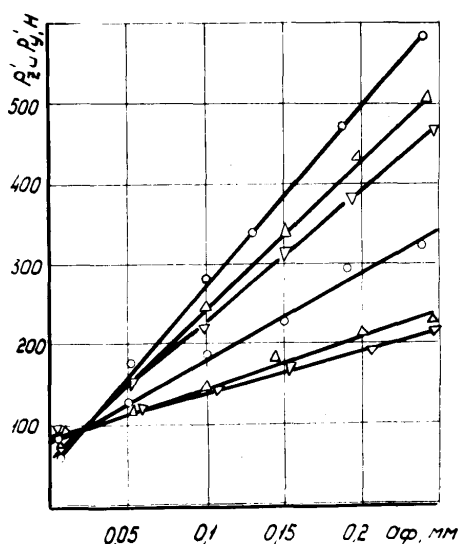
Для такого процесу характерно зменшення інтенсивності наростоутворення та зменшення висоти наросту (рис. 2.6), що сприяє покращення якості обробленої поверхні и будуть впливати на характеристики процесу різання через зміну робочого значення переднього кута γ . На рис. 2.7, 2.8, та 2.9 наведені дані, які показують, що усадка стружки ξ , технологічні складові сили різання тангенціальна P_z і радіальна P_y [27], висота мікронерівності, діаметр завитка стружки D зменшуються з підвищенням ступеня попереднього зміцнення.



($\gamma = 15^\circ$, $\alpha = 3^\circ$; ЗОР – сульфозфрезол)

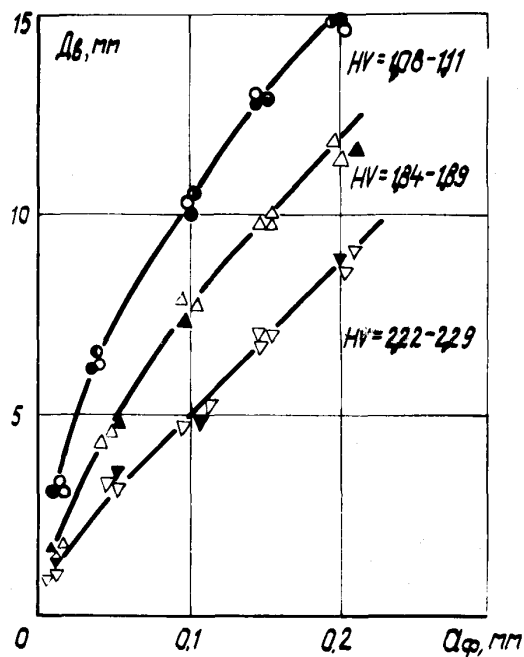
Рис. 2.7. Залежність усадки стружки ξ та висоти мікронерівностей Rz від ступеню зміцнення матеріалу Сталь 10

На рис. 2.7 представлена залежність шорсткості обробленої поверхні від ступеня попереднього зміцнення. Встановлено, що висота мікронерівностей обробленої поверхні зменшується з ростом ступеня попереднього зміцнення.



($\gamma = 15^\circ$, $\alpha = 3^\circ$, $v = 0,083$ м/с, ЗОР – сульфозфрезол)

Рис. 2.8. Залежність технологічних складових сил різання P_z^1 , P_y^1 від товщини зрізу a_ϕ при різанні Сталі 10 зміцненої до різної твердості: $\circ$ – $HV = 1,08 \dots 1,11$ ГПа; Δ – $HV = 1,80 \dots 2,00$ ГПа; ∇ – $HV = 2,20 \dots 2,30$ ГПа

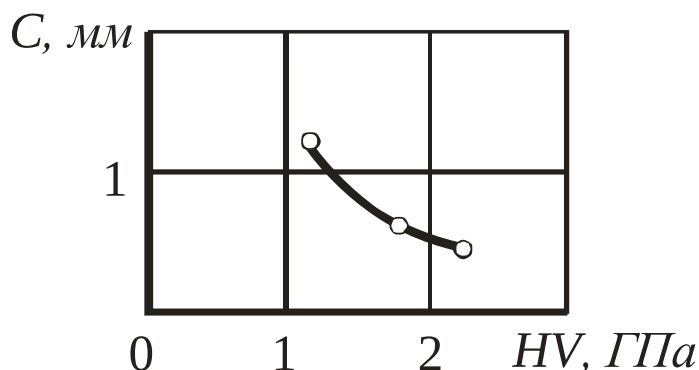


($\gamma = 15^\circ$, $\alpha = 3^\circ$, ЗОР – сульфозфрезол, HV – приведена в ГПа)

Рис. 2.9. Залежність діаметра завитка стружки від товщини зрізу a_ϕ при обробці Сталі 10 з різними швидкостями:

○ $\Delta \nabla$ – 0,02 м/с; ● $\blacktriangle \blacktriangledown$ – 0,08 м/с; ○ $\Delta \nabla$ – 0,32 м/с;

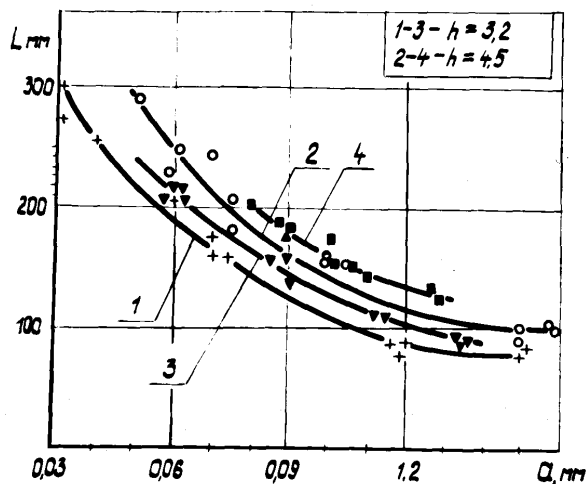
На рис. 2.10 представлена залежність зміни довжини контакту стружки з передньою поверхнею інструмента при вільному різанні сталі 10, зміцненої до різної твердості. Чітко видно, що при підвищенні ступеня попереднього зміцнення оброблюваного матеріалу довжина контакту C різко зменшується. Це приведе до згідно [29, 35] до зростання середнього контактного тиску й зниженню середнього коефіцієнта тертя μ , що сприяє зниженню енерговитрат на процес різання.



($\gamma = 15^\circ$, $\alpha = 3^\circ$, $v = 0,083$ м/с, $a = 0,1$ мм, ЗОР – сульфозфрезол)

Рис. 2.10. Залежність довжини контакту стружки з передньою поверхнею C від ступеня зміцнення (твердості) при вільному різанні Сталі 10

Попереднє пластичне деформування зменшує також діаметр завитка стружки. На рис. 2.11 представлені результати дослідження з визначення критичної довжини протягування при обробці сталі 10ГН.



($\gamma = 15^\circ$, $\alpha = 3^\circ$, $v = 0,083$ м/с, ЗОР – сульфифрезол, різальний матеріал –Р6М5)

Рис. 2.11. Залежність граничної довжини протягування від товщини зрізу при протягуванні від товщини зрізу при протягуванні незміщеної (1, 2) та зміщеної (3, 4) Сталі 10ГН. Режим зміцнення: $\Sigma a = 5$ мм, $a = 1$ мм; ЗОР – сульфифрезол

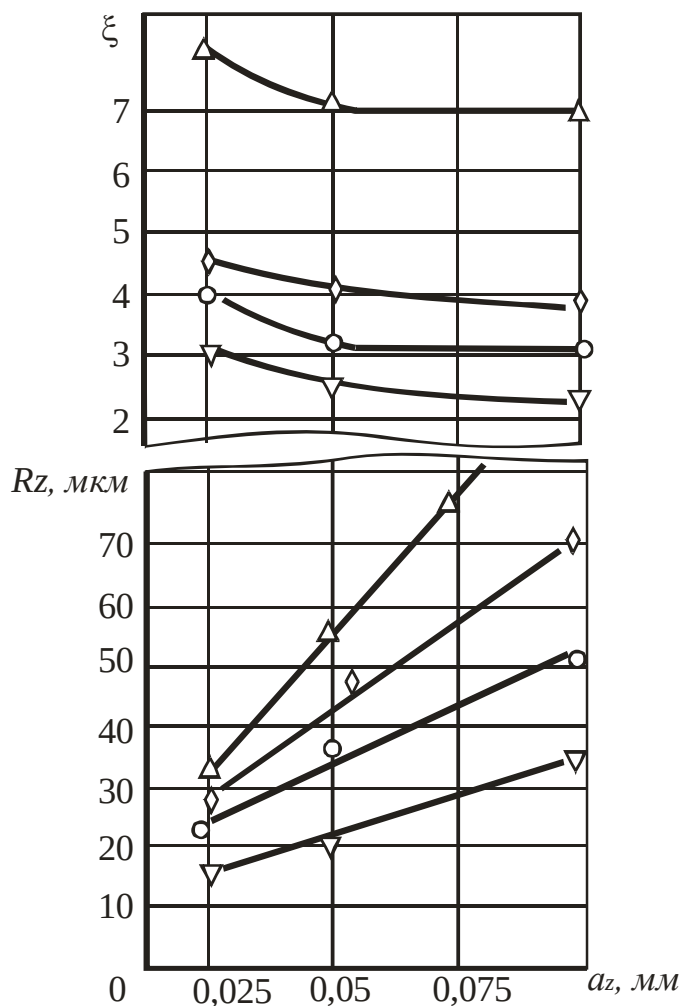
З отриманих залежностей виходить, що попереднє зміцнення дозволяє зменшити діаметр завитка стружки, за рахунок чого збільшується критична довжина протягування $L_{кр}$ на 40-50 %, а процес утворення витка стружки відбувається більш стабільно. Стружка, знята зі зміцненого металу має меншу товщину, вона менш тверда, чим стружка, знята з незміцненого металу й має менші зазори між витками, що сприяє отриманню більше щільного стружкового валика. Що призводить до покращення процесу пакетування стружки у стружковій канавці протяжки при різанні.

2.4. Вплив на оброблюваність пластичних матеріалів кута дії ω

Для процесу протягування характерні малі швидкості різання ($v < 0,3$ м/с), при яких практично відсутній вплив температурного фактора. Тому найбільш ефективно застосовувати для протягування рідини з переважаючим змащувальним ефектом [13, 27].

Раніше [27] було визначено відсутність впливу швидкості різання в межах від 0,0083 до 0,083 м/с на характеристики оброблюваності. Це дозволяє проводити дослідження при швидкості різання $v = 0,0083$ м/с.

На рис. 2.12, 2.13 та 2.14 наведені графіки, з яких треба, що вид ЗОР істотно впливає на досліджувані характеристики оброблюваності.

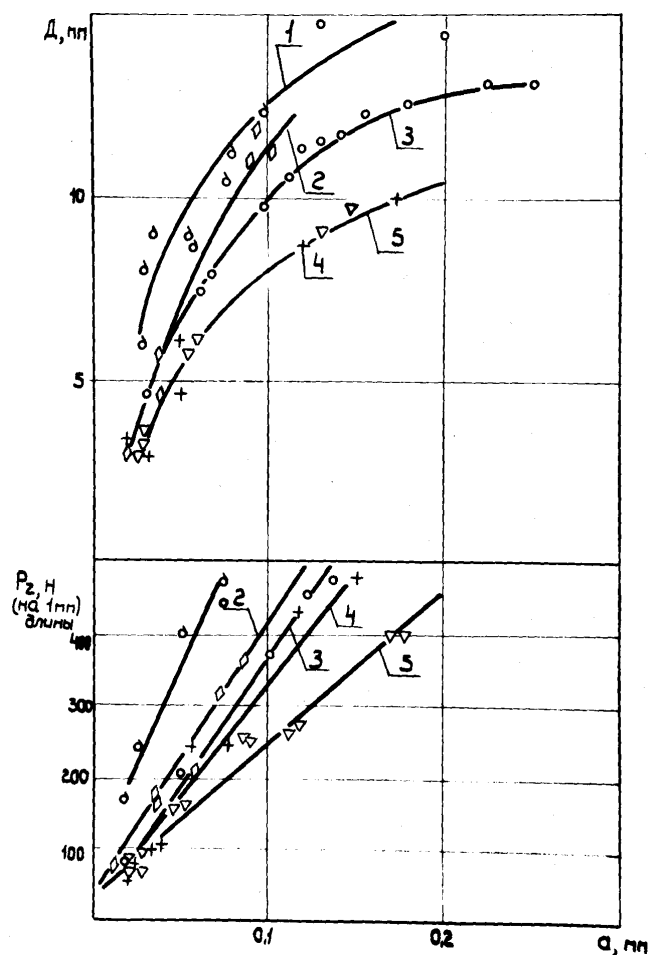


($a = 0,05$ мм, $v = 0,083$ м/с, $\gamma = 15^\circ$, $\alpha = 3^\circ$)

Рис. 2.12. Залежність усадки стружки ξ та висоти мікронерівностей R_z від товщини зрізуваного шару a_z при обробці Сталі 10ГН з різними ЗОР: Δ – 5%-ва емульсія; $\diamond$ – 20 % МР-5+ІС-12, $\circ$ – сульфолфрезол, ∇ – МР-3

При роботі з рідинами на мастильній основі (рис. 2.12, 2.13, 2.14) усадка стружки зменшувалася на 50%, майже у два рази зменшувалася довжина контакту стружки з передньою поверхнею різця, в 2-3 рази зменшувалася шорсткість поверхні, на 30-40% зменшуються сили різання й, що досить істотно, у два рази зменшується діаметр завитка стружки в порівнянні з роботою при 5%-му розчині

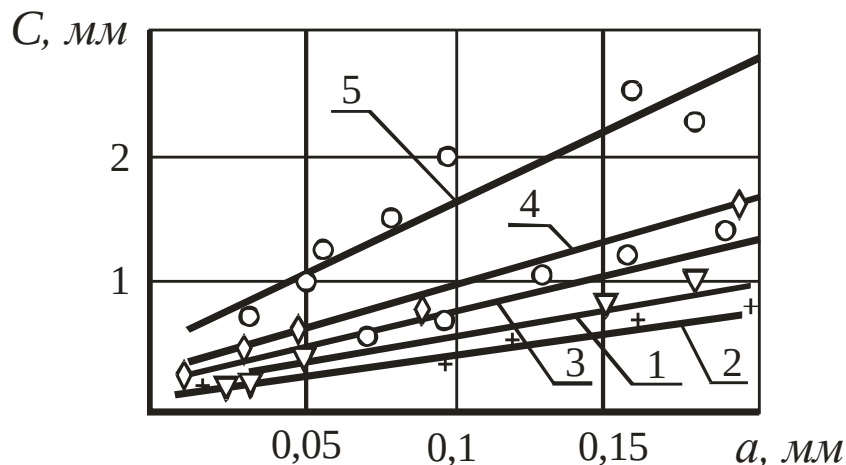
емульсолу. З рідин на мастильній основі найкращі результати були отримані при застосуванні рідин МР-3 і МР-4. Заміна ними сульфозфрезолу на 15-20% зменшує усадку стружки, на 20-30% – діаметр завитка стружки, знижує шорсткість обробленої поверхні.



$$(\gamma = 15^\circ, \alpha = 3^\circ, v = 0,083 \text{ м/с})$$

Рис. 2.13. Залежність питомих сил різання P_z та діаметра завитка D , мм від товщини зрізаного шару a при вільному різанні Сталі 10ГН: 1 – 5%-ва емульсія; 2 – 20 % МР-5+ІС-12, 3 – сульфозфрезол, 4 – МР-3, 5 – МР-4

Як виходить з ряду робіт [26, 29, 31] величина діаметра завитка стружки залежить від процесів, що відбуваються на передній поверхні різця, властивостей оброблюваного матеріалу, геометрії інструмента, товщини зрізу. Визначальною для величини діаметра завитка є процеси, що відбуваються в пружно-пластичній зоні контакту інструмент-деталь, так званий зоні вторинної деформації стружки [31]. Виключення становить швидкість 0,167 м/с.

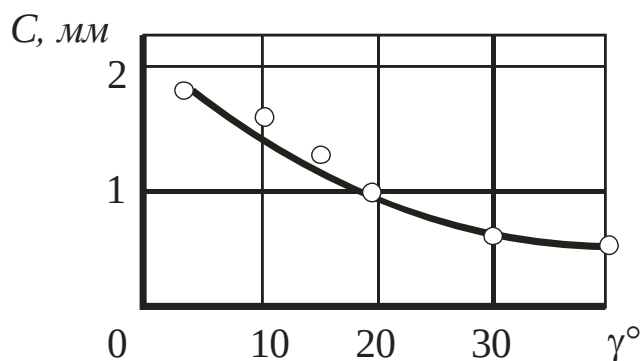


($\gamma = 15^\circ$, $\alpha = 3^\circ$, $v = 0,0083$ м/с, різальний матеріал – Р6М5)

Рис. 2.14. Залежність довжини контакту стружки з передньою поверхнею різця C від товщини зрізуваного шару a при вільному різанні Сталі 10ГН: 1 – МР-4, 2 – МР-3, 3 – сульфозфрезол, 4 – 20 % МР-5+ІС-12, 5 – 5%-ва емульсія

Розміри цієї зони, тобто довжини контакту стружки з передньою поверхнею різця, залежать, згідно [18, 26] від розглянутих параметрів і пов'язані з ними однозначно. Ґрунтуючись на цьому, можна припустити про наявність простого зв'язку між діаметром завитка стружки й довжиною контакту стружки з передньою поверхнею різця.

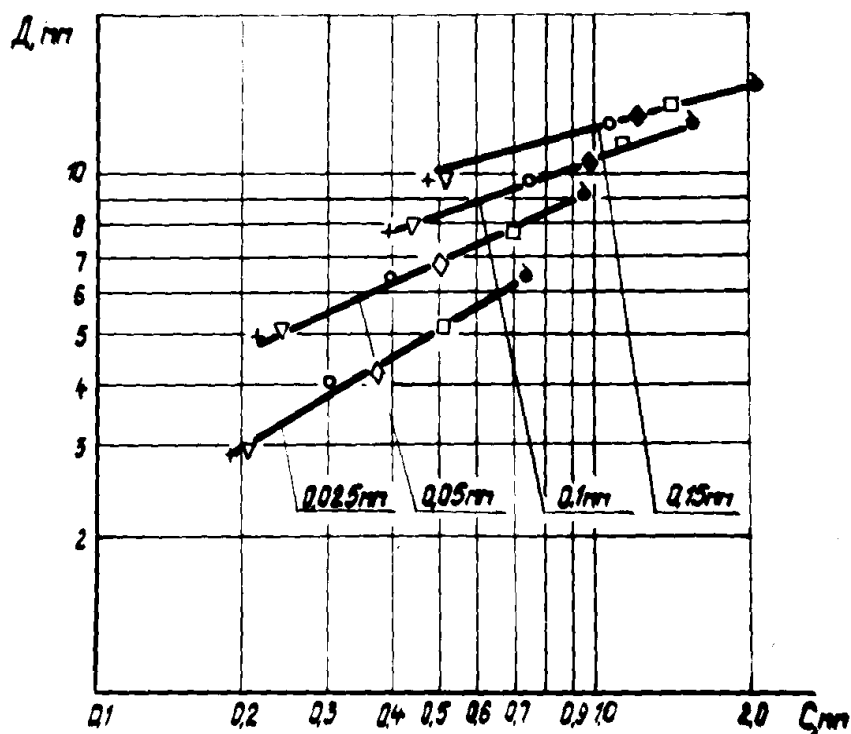
На рис. 2.10 була представлена залежність довжини контакту стружки з передньою поверхнею різця від твердості оброблюваного металу, а на рис. 2.15 від величини переднього кута. Необхідно відзначити, що збільшення переднього кута й збільшення твердості оброблюваного матеріалу зменшують довжину контакту стружки.



($a = 0,1$ мм, $v = 0,0083$ м/с, $\alpha = 3^\circ$, ЗОР – сульфозфрезол)

Рис. 2.15. Залежність довжини контакту стружки з передньою поверхнею різця від величини переднього кута для Сталі 10ГН

На рис. 2.16 представлена залежність діаметра завитка стружки від довжини контакту при різній товщині зрізу. Можна відзначити, що збільшення довжини контакту (у цьому випадку за рахунок зміни коефіцієнта тертя), збільшення товщини зрізу, ведуть до росту діаметра завитка, причому переважаючої є зміна довжини контакту.



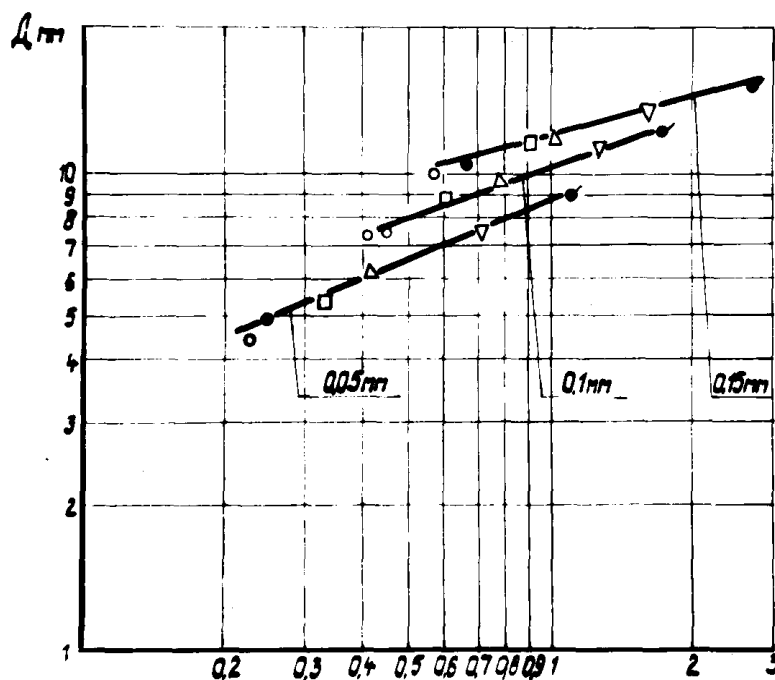
($v = 0,083 \text{ м/с}$, $\gamma = 15^\circ$, $\alpha = 3^\circ$, різальний матеріал –Р6М5)

Рис. 2.16. Залежність діаметра завитка D від довжини контакту стружки C при вільному різанні Сталі 10ГН з різними товщинами зрізу з ЗОР: ∇ – МР-4, $+$ – МР-3, $\circ$ – сульфозрезол, $\diamond$ – 20 % МР-5+ІС-12, $\square$ – без ЗОР, $\circ$ – 5%-ва емульсія

На рис. 2.17 представлена залежність діаметра завитка стружки від довжини контакту при різній товщині зрізу. Довжина контакту в цьому випадку змінювалася за рахунок застосування різних передніх кутів. Збільшення довжини контакту, як і в попередньому випадку, є переважаючим над збільшенням товщини зрізу по впливу на зростання діаметру завитка.

Аналізуючи дані, представлені на рис. 2.16 та рис. 2.17 можна відзначити, що безпосередньо на величину діаметра завитка впливають –довжина контакту стружки з передньою поверхнею різця й товщина зрізу. Зміна довжини контакту можна здійснювати за рахунок зміни переднього кута, за рахунок попереднього

пластичного деформування й за рахунок зміни коефіцієнта тертя в зоні контакту стружка-інструмент. Вплив цих параметрів на величину діаметра завитка здійснюється через зміну довжини контакту рядка з передньою поверхнею.



($v = 0,083$ м/с, $\alpha = 3^\circ$, різальний матеріал –Р6М5, ЗОР – сульфозфрезол)

Рис. 2.17. Залежність діаметра завитка D від довжини контакту стружки C при вільному різанні Сталі 10ГН з різними товщинами зрізу з ЗОР: $\circ - \gamma = 40^\circ$, $\bullet - \gamma = 30^\circ$, $\square - \gamma = 20^\circ$, $\nabla - \gamma = 15^\circ$, $\diamond - \gamma = 10^\circ$, $\Delta - \gamma = 5^\circ$

Після математичної обробки отриманих даних була отримана залежність діаметра завитка від довжини контакту й товщини зрізу для Сталей 10 і 10ГН.

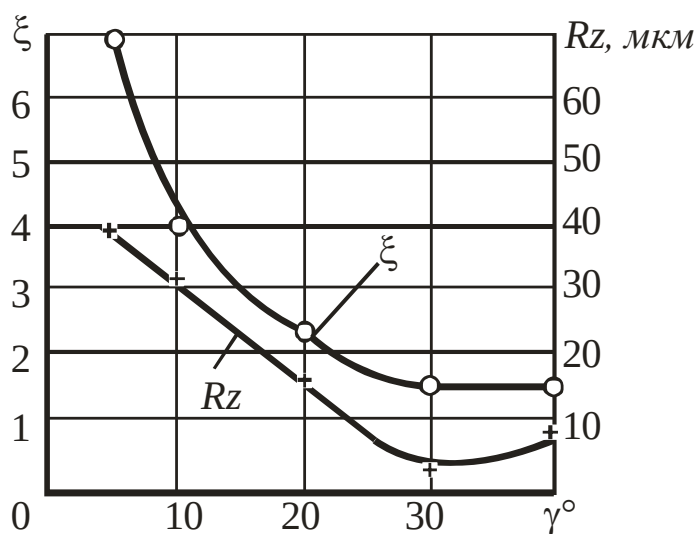
$$D = 7,2 \cdot 10^{1,8a} \cdot C^{0,2a^{-0,24}}. \quad (2.2)$$

Значення діаметрів завитка, розрахованих за визначеною залежністю (2.2) та відомих з реальних процесів різання, добре погоджуються. На рис. 2.16 розрахункові значення представлені прямими, а символами позначені дані з реальних процесів різання. Максимальна похибка не перевищує 5%.

2.5. Вплив переднього кута на оброблюваність пластичних матеріалів

Вивчення коренів стружки показує, що збільшення переднього кута від 10° до 40° приводить до збільшення кута положення площини зсуву φ та робочого дійсного переднього кута γ_f , що сприяє поліпшенню досліджуваних характеристик оброблюваності. Величина переднього кута після заточування визначає дійсний передній кут при різанні. Зі збільшенням переднього угла в досліджуваному діапазоні збільшуються й дійсний передній кут наросту, зростає його стабільність. Що обумовлює збільшення кута φ і зниження напружено-деформованого стану зони стружкоутворення і якість обробленої поверхні.

Збільшення переднього кута до значень $30\text{--}40^\circ$, в залежності від умов роботи (рис. 2.18) зменшує усадку стружки й висоту мікронерівностей R_z . При подальшому його збільшенні, внаслідок втрати жорсткості ріжучого клина, виникають вібрації, що приводить до збільшення висоти мікронерівностей обробленої поверхні. Межею збільшення переднього кута для ріжучого клину, варто вважати втрату ним радіальної жорсткості в зоні пружних переміщень.

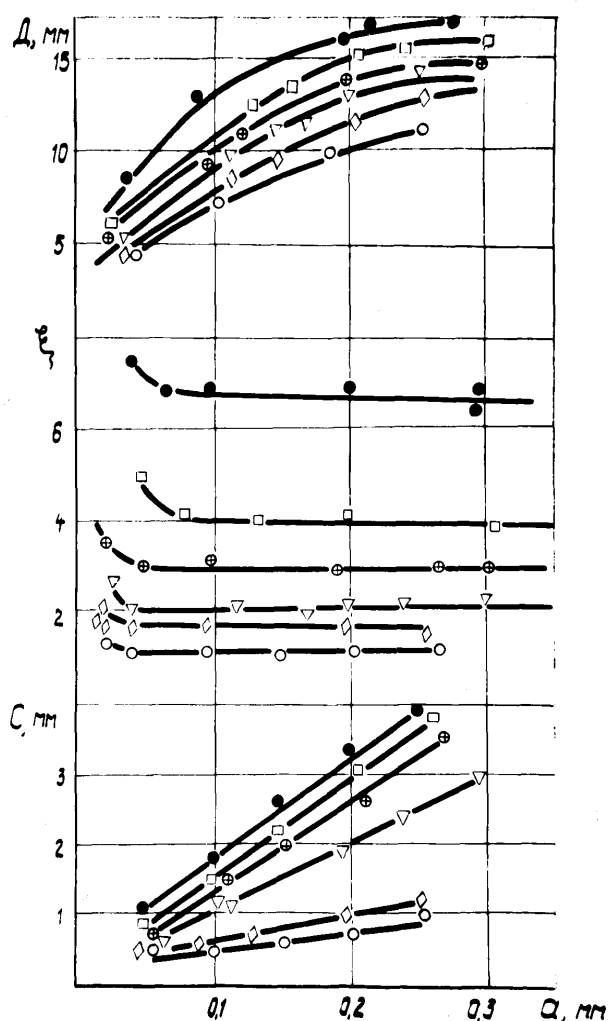


($a = 0,05$ мм, $v = 0,0083$ м/с, $\alpha = 3^\circ$, ЗОР – сульфозфрезол, $HV = 1,78 \dots 1,92$ ГПа)

Рис. 2.18. Залежність усадки стружки ξ та висоти мікронерівностей R_z від величини переднього кута γ при обробці Сталі 10ГН

Аналізуючи вплив переднього кута на усадку стружки і висоту мікронерівностей (рис. 2.18), діаметр завитка стружки та довжину контакту стружки про передній поверхні рівця (рис. 2.19) можна відзначити, що зі збільшенням переднього кута зменшуються такі параметри процесу різання як

усадка стружки, висота мікронерівностей, діаметр завитка стружки, довжина контакту стружки з передньою поверхнею.

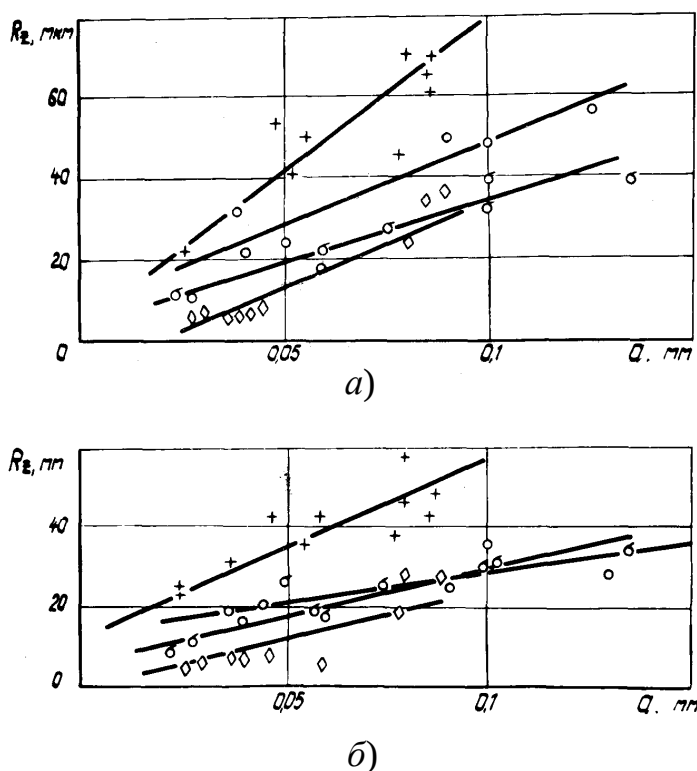


($v = 0,0083$ м/с, $\alpha = 3^\circ$, ЗОР – сульфозфрезол, $HV = 1,78 \dots 1,92$ ГПа)

Рис. 2.19. Залежність діаметра завитку D , мм, усадки стружки ξ , довжини контакту стружки з передньою поверхнею різця від товщини зрізу a , мм при вільному різанні Сталі 10ГН для різних значень переднього кута: $\circ - \gamma = 40^\circ$, $\diamond - \gamma = 30^\circ$, $\nabla - \gamma = 20^\circ$, $\triangle - \gamma = 15^\circ$, $\square - \gamma = 10^\circ$, $\bullet - \gamma = 5^\circ$

На рис. 2.20 представлені залежності висоти мікронерівностей від величини переднього кута γ й товщини зрізу a . Очевидний загальний характер зміни Rz від товщини зрізу. При збільшенні товщини зрізу від 0,015 мм до 0,15 мм спочатку переважає (більше за значенням) шорсткість в поздовжньому напрямку. При збільшенні товщини зрізу від 0,15 мм до 0,3 мм шорсткість у поздовжньому напрямку уступає своє місце (за значимістю) шорсткості в поперечному

напрямку. Звідси виходить, що контроль шорсткості варто робити в обох напрямках, залежно від товщини зрізу.



($v = 0,083$ м/с, $\alpha = 3^\circ$, ЗОР – сульфозфрезол, $HV = 1,78 \dots 1,92$ ГПа)

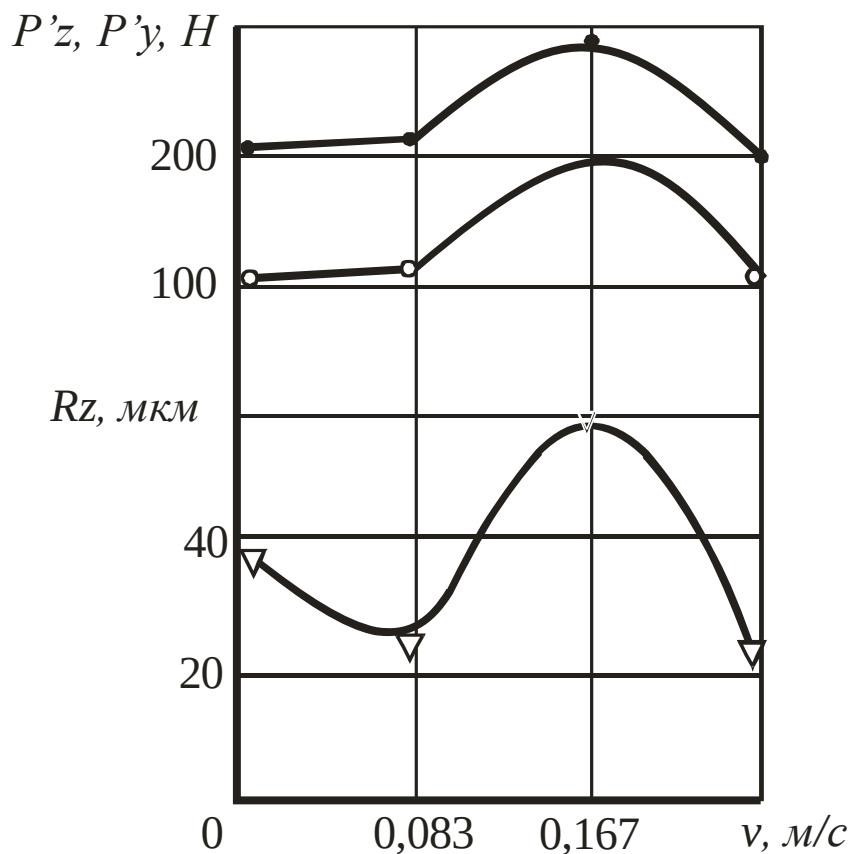
Рис. 2.20. Залежність висоти мікронерівностей R_z , мкм від товщини зрізу a , мм при вільному різанні Сталі 10ГН в повздовжньому (а) та поперечному (б) напрямках для різних значень переднього кута: $\diamond - \gamma = 30^\circ$, $\circ - \gamma = 20^\circ$, $\circ - \gamma = 10^\circ$, $+$ – $\gamma = 5^\circ$

Збільшення переднього кута (рис. 2.20) до $25-35^\circ$, залежно від матеріалу й товщини зрізу, зменшує величину шорсткості R_z , причому, зі збільшенням переднього кута величина мікронерівностей зменшується як у поздовжньому, так і в поперечному напрямках.

2.6. Вплив швидкості різання на оброблюваність пластичного матеріалу

Багато дослідників [18, 25, 31, 35] при дослідженні процесу протягування не відзначають вплив на характеристики оброблюваності металу такого фактора як швидкість різання в межах швидкостей 0,09-0,5 м/с. Тому важливим є вивчити вплив швидкості різання на оброблюваність термообробленої високопластичної Сталі 10ГН.

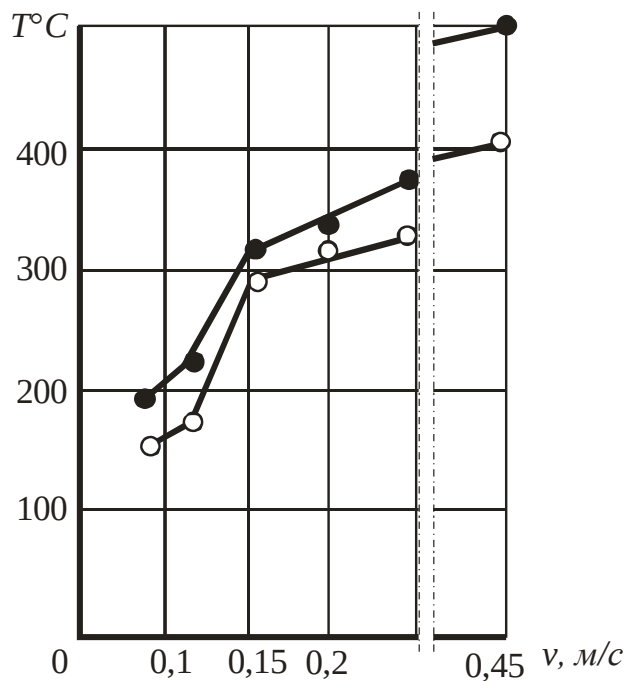
У процесі вивчення виявлено аномальне явище, яке полягає в різкому погіршенні характеристик оброблюваності при швидкості різання 0,167 м/с. Як виходить із графіків, рис. 2.21, 2.22, 2.23, а також з аналізу кореню стружки при різних швидкостях різання усадка стружки, сили різання, шорсткість обробленої поверхні, температура різання, довжина контакту стружки з передньою поверхнею інструмента (діаметр завитка стружки) збільшуються у вузькому діапазоні швидкостей від 0,125 до 0,200 м/с.



($\gamma = 15^\circ$, $\alpha = 3^\circ$, $a = 0,05$ мм, ЗОР – сульфозфрезол, $HV = 1,78 \dots 1,92$ ГПа)

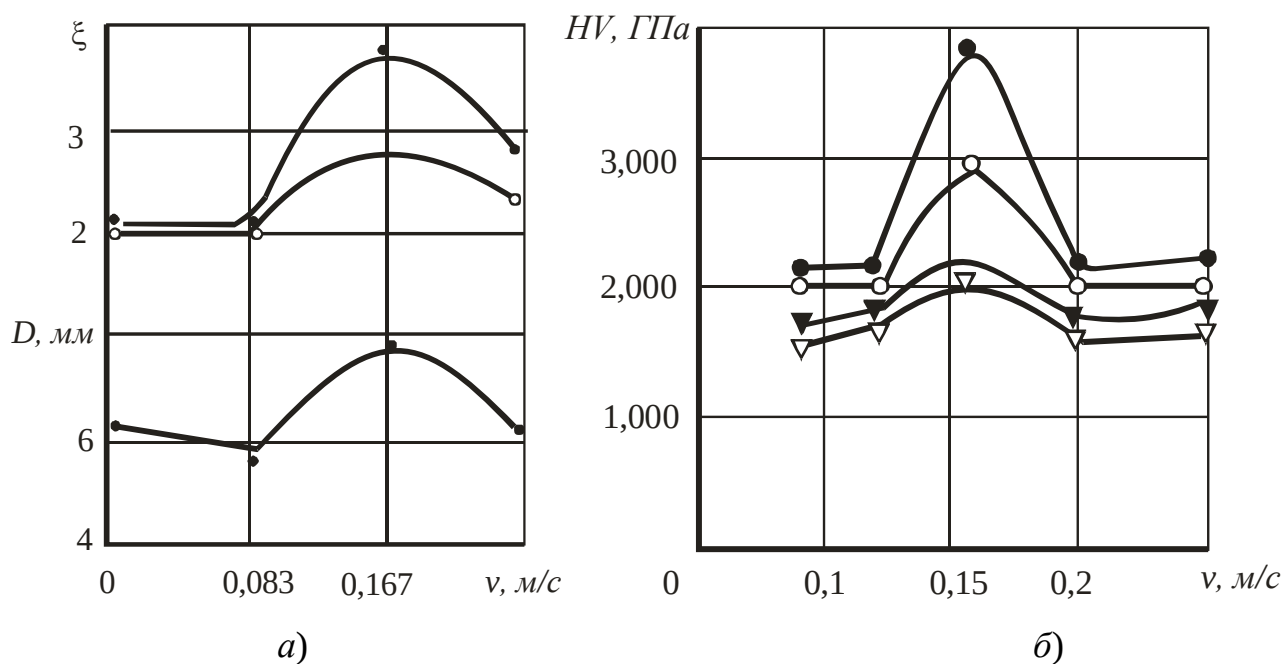
Рис. 2.21. Залежність одиничних сил різання P'_z (●) та P_y (○) та величини мікронерівностей R_z (▽) від швидкості, при обробці Сталі 10ГН

Можна припустити, що для високопластичної Сталі 10ГН у термообробленому стані зона існування стабільного наросту досить вузька по швидкості різання й перебуває в зазначеному діапазоні швидкостей. Зазначене підтверджується збільшенням мікротвердості прирізцевої сторони стружки (рис. 2.23) при швидкості різання 0,167 м/с і зміною температури різання. Температура різання при товщині зрізу вище 0,05 мм, при різанні незміцненого металу перебуває в районі 300°C (рис. 2.22).



($\gamma = 15^\circ$, $\alpha = 3^\circ$, $a = 0,1 \text{ мм}$, $\Sigma a = 5 \text{ мм}$, ЗОР – сульфифрезол)

Рис. 2.22. Залежність температури різання $T^\circ\text{C}$ від швидкості $v, \text{м/с}$ при різанні зміцненої ($\circ$) та незміцненої ($\bullet$) Сталі 10ГН



($\alpha = 3^\circ$, $a = 0,05 \text{ мм}$, ЗОР – сульфифрезол, $HV = 1,78 \dots 1,92 \text{ ГПа}$)

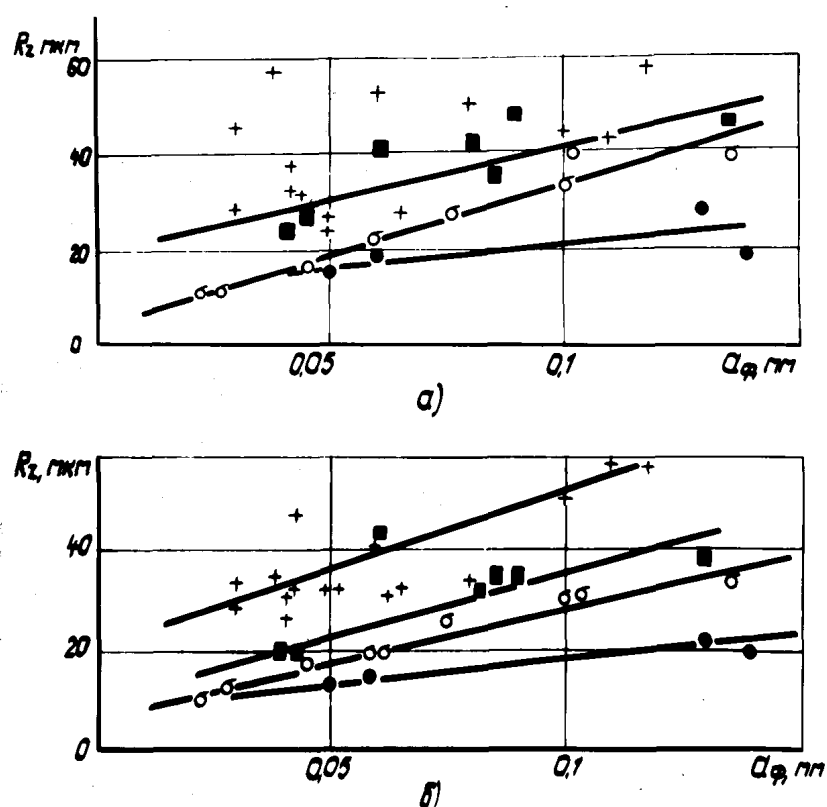
Рис. 2.23. Зміна усадки стружки ξ , діаметру завитка стружки D (а) і мікротвердості прирізцевого боку стружки від швидкості різання v (б) при обробці Сталі 10ГН:

а) $\bullet$ – $\gamma = 15^\circ$, $\circ$ – $\gamma = 90^\circ$

б) для $\gamma = 15^\circ$: $\blacktriangledown$ – $a = 0,05 \text{ мм}$, $\bullet$ – $a = 0,1 \text{ мм}$;

для $\gamma = 30^\circ$: ∇ – $a = 0,05 \text{ мм}$, $\circ$ – $a = 0,1 \text{ мм}$;

Аналізуючи корені стружки при різних швидкостях різання, можна зробити висновок, що нарост при $v = 0,167$ м/с має складну форму з малим значенням дійсного переднього кута. Ширина контакту різця (нарост) – стружка зростає, що свідчить про збільшення ступеня деформації в зоні контакту і як наслідок – погіршенні характеристик оброблюваності: збільшенні усадки й діаметра завитка стружки, сил різання, шорсткості обробленої поверхні. Збільшення швидкості різання в досліджуваній діапазоні зменшує величину шорсткості обробленої поверхні як у поздовжньому, так і в поперечному напрямках (рис. 2.24).



($\gamma = 15^\circ$, $\alpha = 3^\circ$, різал. матеріал Р6М5 ЗОР – сульфозфрезол, $HV = 1,78 \dots 1,92$ ГПа)

Рис. 2.24. Залежність висоти мікронерівностей R_z , мм від товщини зрізу a_ϕ , мм при вільному різанні Сталі 10ГН в поздовжньому (а) та поперечному (б) напрямках при зміні швидкості різання:

○ – $v = 0,25$ м/с; + – $v = 0,167$ м/с, □ – $v = 0,083$ м/с,

■ – $v = 0,0083$ м/с

Необхідно відзначити, що попереднє пластичне деформування (рис. 2.22) і збільшення переднього кута (рис. 2.21, 2.23) знижують інтенсивність протікання процесів при швидкості $0,167$ м/с, що пояснює більше сприятливої для різання формою наросту.

З наведеного виходить, для того щоб уникнути погіршення якості обробленої поверхні та для підвищення стійкості різального інструменту швидкість різання при обробці високопластичних сталей не повинна перебувати в межах швидкостей від 0,125 до 0,200 м/с. Збільшення швидкості різання понад 0,2 м/с веде до зменшення величини шорсткості, усадки стружки й інших характеристик процесу різання.

У результаті аналізу літературних джерел та на підставі отриманих даних була запропонована схема взаємозв'язку факторів у процесі різання, рис. 2.25. Запропонована схема дає можливість визначити, якими факторами доцільно управляти для підвищення оброблюваності високопластичних сталей. Як критерій оброблюваності в пропонуваній схемі прийнятий кут нахилу площини зсуву φ .

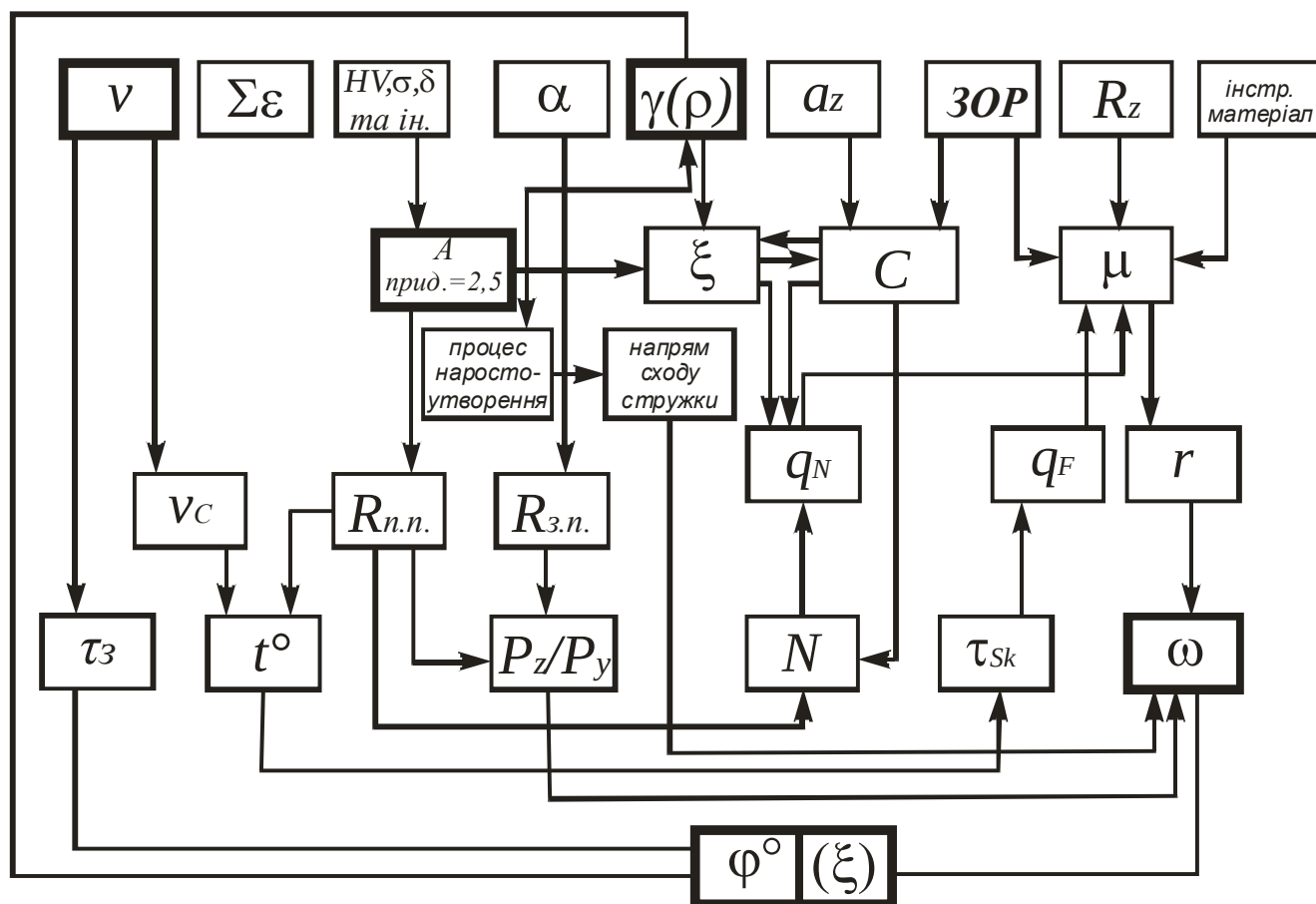


Рис. 2.25. Взаємозв'язок кута φ з елементами процесу різання

3. ВПЛИВ ОСНОВНИХ ФАКТОРІВ ПРОЦЕСУ РІЗАННЯ ПРИ ПРОТЯГУВАННІ НА СТІЙКІСТЬ ПРОТЯЖКИ

3.1. Різання незміцненого матеріалу

Визначення залежності стійкості інструмента від факторів, що на неї впливають [3, 11, 18, 31, 30] та врахування їх взаємодії представимо за допомогою залежностей у вигляді поліномів. При вирішенні задач визначення стійкості різальної частини протяжки характер залежності буде мати вигляд:

$$y_i = c_i \cdot V^{n_i} \cdot a^{m_i} \cdot \gamma^{p_i} \cdot \alpha^{q_i}, \quad (3.1)$$

де y_i – параметр стійкості інструмента;

c_i – постійний коефіцієнт.

Досліджувані параметри, та їх граничні значення наведені у таблиці 3.1.

Таблиця 3.1

Фактори варіювання, одиниці вимірювання	Закодоване значення	Значення факторів			Інтервал варіювання
		+1	0	-1	
$\gamma, ^\circ$	x_1	30	20	10	10
$\alpha, ^\circ$	x_2	7	4	1	3
$a, \text{мм}$	x_3	0,15	0,1	0,005	0,05
$V, \text{м/с}$	x_4	0,33	0,2	0,083	0,125

Доведено, що збільшення переднього кута більше 30° , при товщині зрізу більше 0,1 мм призводить до втрати жорсткості різального клину. За нижню межу переднього кута обрано найбільше розповсюджене значення кута у протяжок, що використовуються у машинобудуванні.

Обробка отриманих результатів відбувалась за дисперсією відтворюваності $S^2\{y\}$, тобто кількість досліджень визначалась за залежністю:

$$S^2\{y\} = \frac{\sum_{i=1}^n (y_u - \bar{y})^2}{n-1}, \quad (3.2)$$

де u – номер дослідів,

n – кількість паралельних дослідів,

$\bar{y}$ – середнє арифметичне значення результатів.

Дисперсія у визначенні коефіцієнтів визначалась з залежності

$$S^2\{y\} = \frac{\sum_{i=1}^n (y_u - \bar{y})^2}{n-1}, \quad (3.3)$$

де N – кількість ступенів свободи.

Перевірка значимості коефіцієнтів регресії здійснювалась за критерієм Стюдента, а адекватність отриманої моделі за критерієм Фішера. Після математичного опрацювання отримана математична модель в кодованому значенні факторів та в значенні самих факторів:

$$y = 5,9 + 0,17x_1 + 0,09x_2 - 0,36x_4 - 0,2x_3 + 0,07x_1 \cdot x_4, \quad (3.4)$$

$$y = 5,9 + 0,17\gamma + 0,09\alpha - 0,36v - 0,2a + 0,07\gamma \cdot v.$$

З рівняння (3.4.) виходить, що стійкість різального інструменту зростає зі збільшенням переднього та заднього кутів, причому збільшення переднього кута суттєво більше впливає на стійкість чим заднього. Збільшення швидкості різання та товщини зрізу призводить до зменшенню стійкості інструмента. Значимим виявилась взаємодія переднього кута та швидкості. Це пояснюється зміною дійсного (робочого) переднього кута при зміні швидкості внаслідок зміни інтенсивності наростоутворення.

Для визначення чисельних значень параметрів, що необхідні для застосування на практиці застосуємо залежності переходу до виразу реальних значень моделі (3.4):

$$x_i = \frac{2(\ln \bar{x}_i - \ln x_{i \max})}{\ln x_{i \max} - \ln x_{i \min}} \quad (3.5)$$

де x_i – кодоване значення фактору,

$\bar{x}_i$ – натуральне значення фактору.

Після перетворення отримане рівняння набуде вигляду:

$$T = \frac{584 \cdot \alpha^{0,1} (60 \cdot v)^{(0,2 \ln \gamma - 1)}}{\gamma^{0,1} \cdot a_z^{0,4}}, \text{ хв} \quad (3.6)$$

де $\alpha, ^\circ$ – задній кут інструменту,

$\gamma, ^\circ$ – передній кут інструмента,

a_z – товщина зрізу, мм,

v – швидкість різання, м/с.

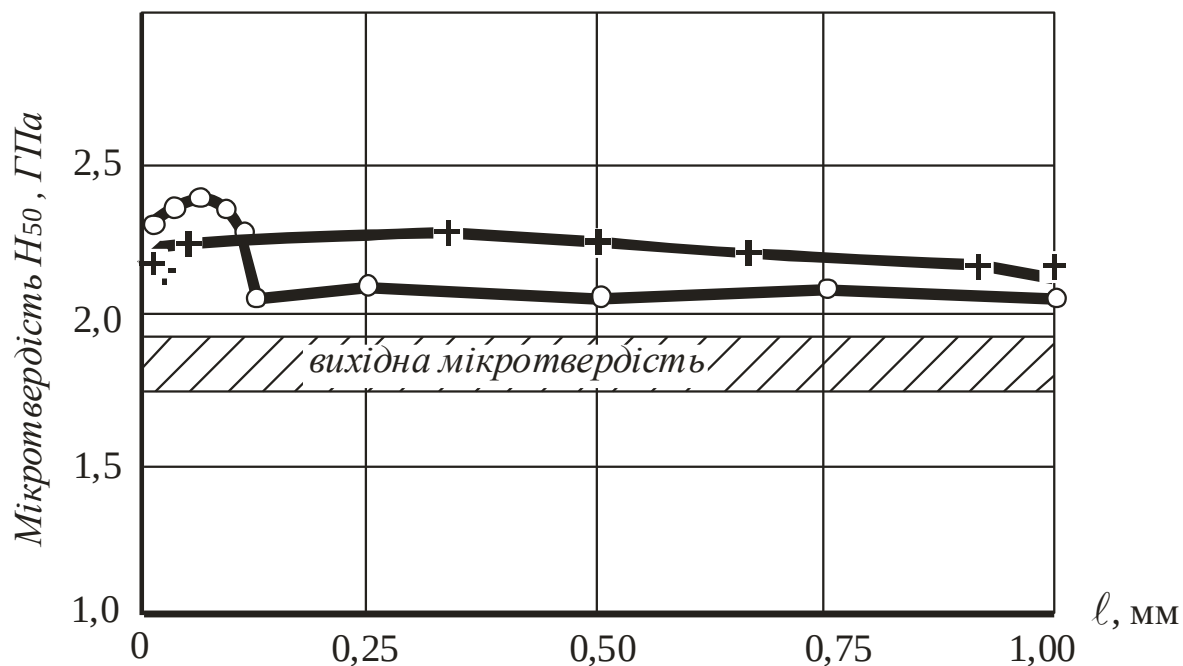
Значення стійкості різального інструменту, розраховані за наведеною залежністю мають відхилення у встановлених межах.

3.2. Визначання стійкості різального інструменту при обробці металу з різною твердістю

У відомих роботах недостатні дані про стійкість різального інструменту при обробці сталей типу 10ГН, як у стані постачання, так і після обробки холодним пластичним деформуванням.

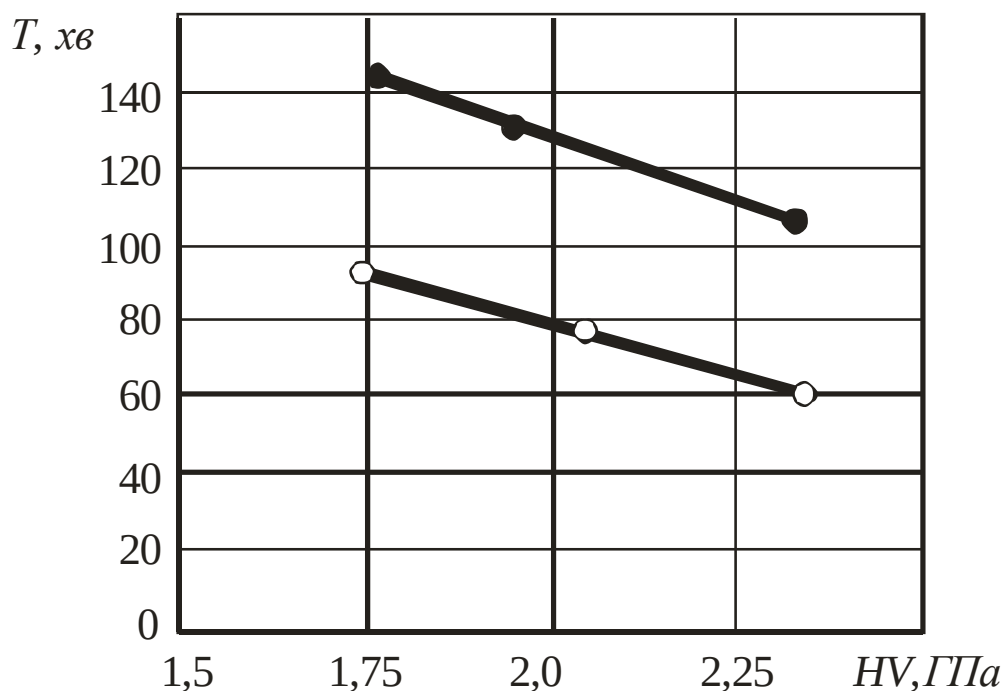
На рис. 3.1. показаний розподіл мікротвердості по товщині стінки при різних режимах обробки деформуючим протягуванням. Можна помітити, що мікротвердість по товщині стінки різна та глибина зміцненого шару, в залежності від режимів деформування, може коливатись від декількох сотих міліметрів до цілих міліметрів. Тому зуби різальної частини протяжки працюють в різних умовах, знімаючи різний за твердістю метал, що не може не відбитись на їх стійкість.

Як виходить з [35], характер зміни стійкості різального інструмента від твердості попередньо зміцненого деформуючим протягуванням металу ілюструється прямою лінією (рис. 3.2). При цьому збільшення твердості металу викликає зниження стійкості різального інструмента, якщо обробка відбувається на швидкостях, де переважним за своїм значенням є механічне спрацювання. Це твердження справедливо для усього діапазону швидкостей, що застосовуються на протяжних верстатах. При збільшенні переднього кута до 30° стійкість різального інструмента підвищується на постійну величину, незалежну від твердості обробного матеріалу.



($\Sigma a = 5$ мм, $v = 0,083$ м/с, ЗОР – сульфобрезол)

Рис. 3.1. Розподіл мікротвердості H_{50} сталі 10ГН за товщиною стінки у вихідному стані та після деформуючого протягування з натягами:
 $\circ$ – $a = 0,5$ мм, $+$ – $a = 1,5$ мм



($a = 0,08$ мм, $v = 0,083$ м/с, $\alpha = 3^\circ$, ЗОР – сульфобрезол, різальний матеріал Р6М5)

Рис. 3.2. Залежність стійкості різального інструменту від твердості обробного матеріалу при вільному різанні сталі 10ГН з різними передніми кутами: $\circ$ – $\gamma = 15^\circ$, $\bullet$ – $\gamma = 30^\circ$

Розглянуті міркування стали основою для створення методики для визначення стійкості різального інструмента при обробці сталей з різною мікротвердістю за товщиною стінки.

Методика полягає у тому, що спочатку вимірюють розподіл твердості по зразку, потім здійснюють різання інструментом цього зразку за заданий проміжок часу з повздовжньою подачею, та роблять висновок про стійкість за ступенем спрацювання інструменту. Для цього використовують зразок зі змінною у перетині твердістю, перпендикулярною напряду подачі, а ширину різальної кромки обирають більшою за товщину зразку. За даними розподілу мікротвердості по товщині стінки будують графік розподілу мікротвердості, на який накладають профілографу спрацьованої поверхні.

На рис. 3.3 проілюстровано розглянутий метод. На рис. 3.3., *а* – схема обробки зразка; рис. 3.3, *б* – розподіл мікротвердості по товщині стінки деталі *t* та профілограма спрацьованої поверхні (величина фаски спрацювання по задній поверхні), по довжині робочої частини різальної кромки *OL*, а на рис. 3.3, *в* графік для визначення стійкості інструменту для різних значень твердості обробного матеріалу в необхідному діапазоні значень.

Апробація методу здійснювалась наступним чином. У якості зразка використовувалася труба зі сталі 10ГН, попередньо оброблена деформуючої протяжкою із сумарною деформацією 5 мм. Обробка деформуючим протягуванням дозволила одержати нерівномірний розподіл мікротвердості по товщині стінки ($H_{0.1}^{\min} = 1,8 \text{ ГПа}$, $H_{0.1}^{\max} = 2,4 \text{ ГПа}$). Товщина стінки труби – 10 мм; внутрішній діаметр після деформуючого протягування – 115 мм. Ширина різця, виготовленого зі сталі 10ГН (HRC 60-61), була 14 мм. Це дозволило здійснити процес вільного торцевого різання. Різання здійснювалося з поздовжньої подачею $S = 0,04 \text{ мм/об}$ без поперечних переміщень. При цьому кожна точка на ріжучій поверхні різця, що беруть участь у процесі різання, знімала оброблюваний матеріал постійної певної твердості.

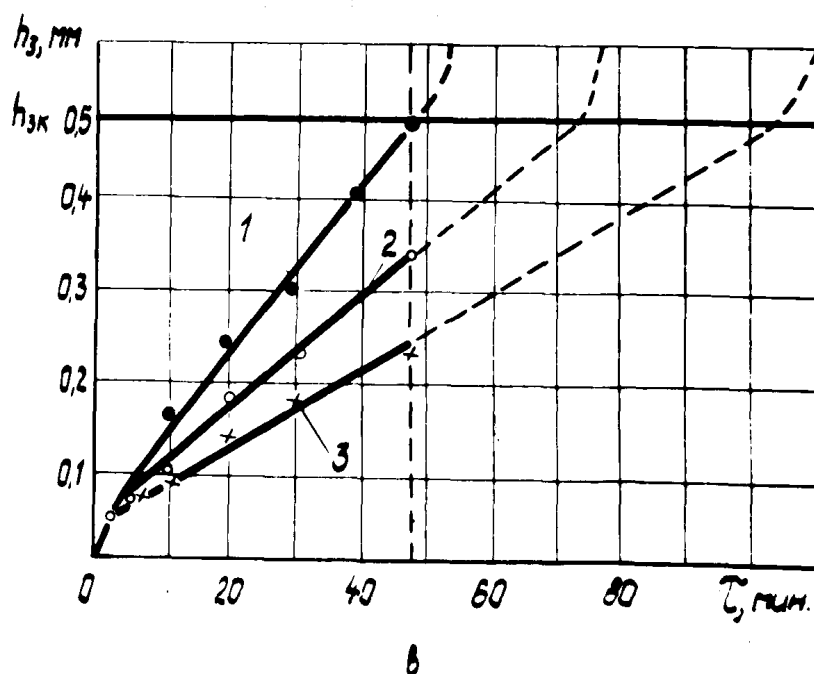
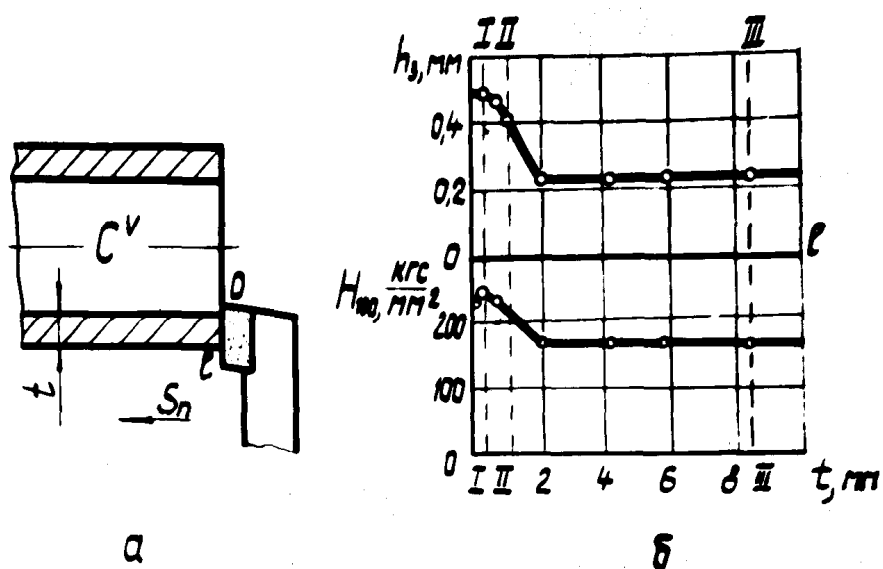


Рис. 3.3. Метод визначення стійкості різального леза при обробці метала зі зміною твердістю за глибиною різання: схема обробки (а), розподіл мікротвердості H_{100} та профілограми спрацьованої поверхні інструменту за товщиною стінки деталі t (б); залежності спрацювання інструмента від часу його роботи для різних значень твердості обробного матеріалу

Швидкість різання дорівнювала $0,063 \text{ м/с}$. У якості ЗОР використовувався сульфифрезол. Спрацювання різця контролювалось по довжині ріжучої кромки виміром фаски спрацювання по задній поверхні через кожні 25 метрів шляху різання до досягнення в одній із точок задньої поверхні інструмента прийнятого критерію затуплення $h_{\text{зк}} = 0,5 \text{ мм}$.

За отриманими результатами будувався графік розподілу мікротвердості твердості H_{100} по товщині заготівлі (рис. 3.3 б), профілограму зношеної поверхні інструмента (фаски спрацювання h_3), сполучали їх (рис. 3.3 б) і будувалися залежності спрацювання інструмента від часу його роботи для різних значень твердості оброблюваного матеріалу (рис. 3.3 в) по досягненні в одній із точок ріжучої кромки прийнятого критерію затуплення. Крива 1 рис. 3.3 в є залежністю величини фаски затуплення від часу роботи різця по шару, що має максимальну мікротвердість (перетин I-I рис. 3.3 б). Ділянки кривих 2 і 3, позначені на рис. 3.3 суцільними лініями, отримані для інших значень твердості H_2 і H_3 оброблювані матеріали (перетин II-II й III-III на рис. 3.3 б) у процесі проведення єдиного досліду, що дав і криву 1. Щоб визначити значення T_2 і T_3 стійкості інструментів, що відповідають прийнятому критерію затуплення для цих значень твердості оброблюваного матеріалу, необхідно продовжити криві 2 і 3 (рис. 3.3 в) до перетинання їх з горизонтальною лінією на графіку, що відповідає $h_{\text{зк}}$. Крім того, графік (рис. 3.3 в) дозволяє одержати значення з стійкості T_2 і T_3 за залежностями:

$$T_2 = T \frac{H_1}{H_2} \text{ та } T_3 = T_1 \frac{H_1}{H_3}, \quad (3.7)$$

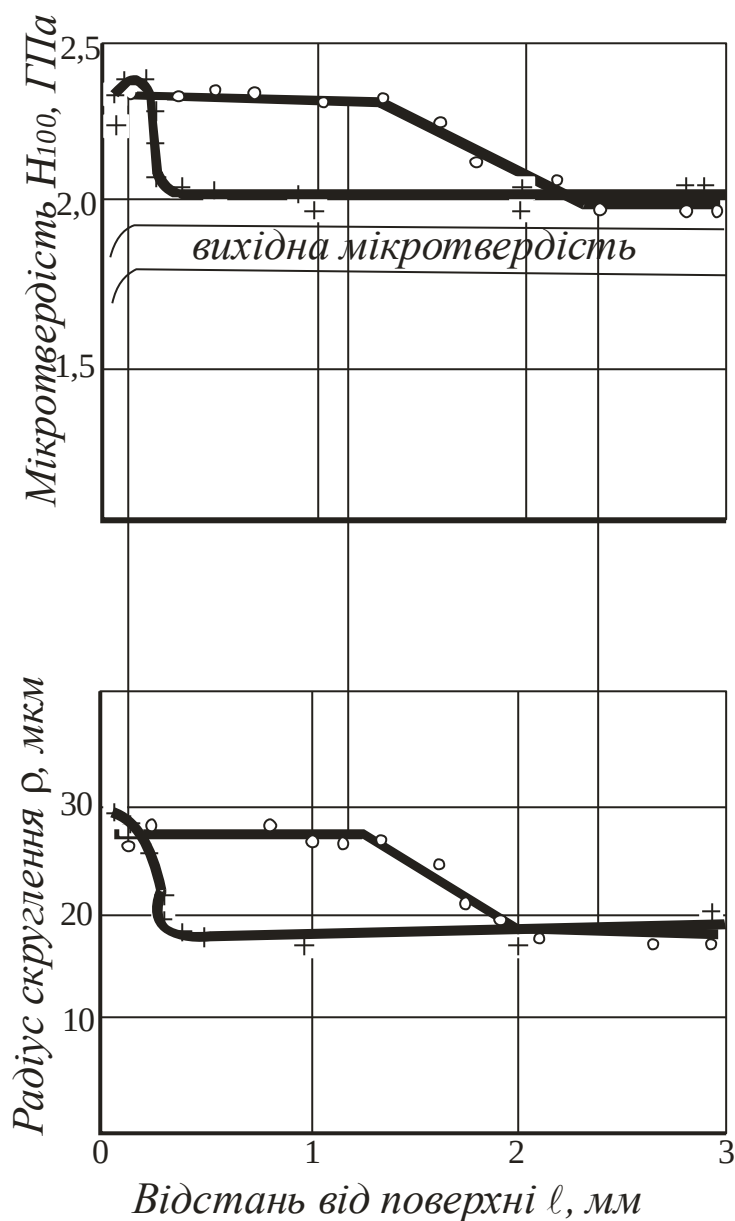
де T_1 – стійкість інструмента при твердості H_1 оброблюваного матеріалу, що відповідає прийнятому критерію затуплення $h_{\text{зк}}$.

Для перевірки правильності запропонованої методики були проведені порівняння з іншими відомими методиками (А.С. Кондратова, Е.К. Посвятенко й ін.). Ці порівняння показали, що час стійкісних випробувань за розглянутою методикою в 4-12 разів менше, ніж по відомим. Інформативність методики також значно вище, тому що вона дає можливість одержати безперервну криву зношування по всьому діапазону твердості. По відомих методиках ця крива будується по окремим точкам.

Методика перевірена в діапазоні швидкостей різання 0,04-0,2 м/с, характерних для ріжучого протягування й стругання. Це дозволяє правильно підходити до розрахунку й проектуванню різального інструменту й призначенню режимів різання при обробці металу змінної твердості. Так, на підставі методики була розроблена й вивчена ріжуча протяжка діаметром 114,5 мм. Високопластична сталь 10ГН, з якої були деталі, попередньо зміцнені холодною деформацією до різної твердості по товщині стінки. Таким чином, протягуванням зрізався змінний за твердістю припуск. При розрахунку протяжки це було враховано шляхом вибору кількості її зубів, схеми зрізання припуску, а також розподілу припуску між чорновими й чистовими зубами. У результаті розроблена протяжка мало рівну стійкість всіх зубів при роботі з металу змінної твердості, що є найбільш вигідним з економічної точки зору [30]. Серійне протягування в таких же умовах роботи має в 2,2 рази більш низьку стійкість, тому що її зуби, що працюють по найбільш зміцненому металу, зношувалися значно швидше за інших.

Розбіжність між значеннями стійкості, певна за запропонованому методу й отриманих методом повних стійкісних випробувань, добре погоджуються. Необхідно відзначити, що як критерій спрацювання можна використовувати як радіус округлення ріжучого леза, так і фаску спрацювання по задній поверхні (рис. 3.4), тому що значення стійкості, отримані по кожному із двох пропонуванних критеріїв добре погоджуються.

Таким чином, як виходить з залежності (3.6), стійкість різального інструменту при обробці високопластичних сталей можна підвищити в 1,5 рази, застосовуючи передні кути порядку 30° замість $10-15^\circ$. Збільшення швидкості протягування сталі 10ГН і товщини зрізу в дослідженому діапазоні веде до зменшення стійкості інструмента. У якості критерію затуплення протяжок, що працюють по високопластичних сталях типу 10ГН, можна використовувати як радіус округлення ріжучої кромки ($\rho = 30$ мкм для чорнових і $\rho = 20$ мкм для чистових зубів), так і величину фаски спрацювання зуба по задній поверхні (відповідно 0,4 і 0,2 мм), тому що між цими критеріями існує взаємозв'язок.



($\gamma = 15^\circ$, $v = 0,083$ м/с, $a = 0,08$ мм, ЗОР – сульфозрезол)

Рис. 3.4. Залежності мікротвердості H_{100} сталі 10ГН, радіуса скруглення ρ різальної кромки різця від відстані до поверхні отвору втулки після деформуючого протягування з натягами:

○ – $a = 0,5$ мм, + – $a = 1,5$ мм

Попереднє холодне зміцнення втулки трохи знижує стійкість ріжучої частини протяжки й приводить до різної твердості по товщині стінки. Отже, для підвищення стійкості зубів протяжки це необхідно враховувати шляхом вибору кількості зубів протяжки, схеми різання, а також розподілу припуску між чорновими й чистовими зубами.

4. ТЕХНІКО-ЕКОНОМІЧНЕ ОБҐРУНТУВАННЯ РОБОТИ

4.1. Розрахунок основних техніко-економічних показників

4.1.1 Загальні вихідні дані

Запропонована за результатами даної кваліфікаційної роботи конструкція різальної протяжки призначена для протягування круглих отворів у високопластичних матеріалах, таких як сталь 10ГН. Перевагами оригінальної конструкції даного інструменту є можливість багатократного переточування різальних зубців без втрат точності обробки круглих отворів, а також можливість їх заміни при повному зношенні.

Для розрахунку показників економічної ефективності нової конструкції розглянемо процес протягування круглих отворів на горизонтально-протяжному верстаті моделі 7545. В якості бази для порівняння приймемо звичайну суцільну протяжку.

Розрахуємо річну потребу в інструменті за формулою:

$$\kappa_i = \frac{N_{\partial} \cdot T_{\text{нор}} \cdot \gamma \cdot \kappa_{\text{вт}}}{t_e (1 + p)}, \quad (4.1)$$

де N_{∂} – річна програма виробництва деталей, шт./рік;

$T_{\text{нор}}$ – штучний час обробки однієї деталі, год.;

γ – питоме значення машинного часу в загальному його варіанті;

$\kappa_{\text{вт}}$ – коефіцієнт випадкової втрати інструменту;

t_e – економічна стійкість інструменту, год.;

p – кількість переточок інструменту до повного зносу.

В базовому варіанті:

$$\kappa_{\text{баз}} = \frac{50000 \cdot 0,5 \cdot 0,45 \cdot 1,1}{840 \cdot (1 + 12)} = 2 \text{ шт.} \quad (4.2)$$

В проектному варіанті:

$$\kappa_{np} = \frac{50000 \cdot 0,5 \cdot 0,45 \cdot 1,1}{1440 \cdot (1+15)} = 1 \text{ шт.} \quad (4.3)$$

4.1.2. Витрати на проектування збірної протяжки визначаємо за формулою:

$$B_{нк} = H_{op} \cdot T_{кон} \cdot 3_{сг}^к \cdot \left(1 + \frac{\kappa_d}{100}\right) \cdot \left(1 + \frac{B_c}{100}\right) + H_{\epsilon} \quad (4.4)$$

де H_{op} – кількість найменувань оригінальних деталей, які входять до конструкції інструменту;

$T_{кон}$ – сумарна кількість годин на розробку усіх видів конструкторської документації, яка в середньому припадає на одне найменування оригінальної деталі;

$3_{сг}^к$ – середньогодинна заробітна плата конструктора, грн./год;

κ_d – додаткова заробітна плата конструктора, %;

B_c – відрахування у соціальні фонди від заробітної плати конструкторів, %;

H_{ϵ} – накладні витрати, грн. (визначаються в процентах від основної заробітної плати конструктора).

$$B_{нк} = 10 \cdot 19 \cdot 85,56 \cdot \left(1 + \frac{10}{100}\right) \cdot \left(1 + \frac{22}{100}\right) + 10 \cdot 19 \cdot 85,56 \cdot \frac{45}{100} = 29131,47 \text{ грн.}$$

4.1.3. Витрати на технологічну підготовку виробництва збірної протяжки:

$$B_m = H_{op} \cdot T_{mex} \cdot 3_{сг}^m \cdot \left(1 + \frac{\kappa_d}{100}\right) \cdot \left(1 + \frac{B_c}{100}\right) + H_{\epsilon} \quad (4.5)$$

де T_{mex} – сумарна трудомісткість технологічних робіт, які припадають на одне найменування оригінальної деталі;

$3_{сг}^m$ – середньогодинна заробітна плата технолога, грн./год.

$$B_{нк} = 10 \cdot 21 \cdot 83,81 \cdot \left(1 + \frac{10}{100}\right) \cdot \left(1 + \frac{22}{100}\right) + 10 \cdot 21 \cdot 83,81 \cdot \frac{45}{100} = 31539,38 \text{ грн.}$$

4.1.4. Визначення витрат на виготовлення інструменту

Трудовістість виготовлення збірної ріжучої протяжки визначаємо в нормо-годинах за формулою:

$$T_o = \sum_{i=1}^m T_i, \quad (4.6)$$

де T_z , T_m , T_t , T_c , T_{in} – трудовістість заготівельних, механічних, термічних, складальних та інших робіт (встановлена експертним шляхом та за допомогою нормативно-довідкової інформації).

Далі розраховуємо:

– основну заробітну плату виробничих робітників:

$$Z_{op} = \sum_{i=1}^m C_{zi} \cdot T_i, \quad (4.7)$$

де m – кількість і-х видів робіт по виготовленню інструменту;

C_{zi} – середньогодинна тарифна ставка робітників, які виконують і-тий вид робіт, з врахуванням умов праці, грн.

Наприклад, основна заробітна плата виробничих робітників на механічних роботах по виготовленню інструмента:

$$Z_{op}^M = 77,979 \cdot 4,8 = 374,30 \text{ грн.}$$

Аналогічно виконуємо розрахунки основної заробітної плати на інших роботах, результати складаємо і заносимо до табл. 4.2.

– витрати на утримання та експлуатацію обладнання:

$$B_o = \sum_{i=1}^m Z_{opi} \cdot \frac{P_{ep}}{100}, \quad (4.8)$$

де P_{ep} – процент витрат на утримання та експлуатацію обладнання по кожному і-му виду робіт за заводською документацією.

– цехові витрати:

$$K_{цex} = \sum_{i=1}^m Z_{opi} \cdot \frac{P_{цex}}{100}, \quad (4.9)$$

де $P_{цex}$ – процент цехових витрат по кожному і-му виду робіт за заводською калькуляцією.

Для механічних робіт:

$$B_o^M = 374,30 \cdot \frac{385}{100} = 1441,05 \text{ грн.};$$

$$K_{цех}^M = 374,30 \cdot \frac{232}{100} = 868,37 \text{ грн.};$$

Аналогічно виконуємо розрахунки даних статей на інших роботах, результати складаємо і заносимо до табл. 4.2.

Таблиця 4.2.

Трудомісткість виготовлення та окремі види витрат, які включені в собівартість комбінованої протяжки.

Види робіт	Трудомісткість робіт, нормо-год	Середній розряд	Середньогодинна тарифна ставка робітників, грн./год	Основна заробітна плата робітників, $З_{ор}$, грн.	Витрати на утримання та експлуатацію обладнання, B_o		Загальноцехові витрати, $K_{цех}$	
					%	грн.	%	грн.
Заготівельні	0,66	4	66,354	43,79	245	107,29	232	57,81
Механічні	4,80	4	77,979	374,30	385	1441,05	232	868,37
Термічні	2,50	3	87,048	217,62	395	859,60	282	613,69
Складальні	0,52	4	77,979	40,55	210	85,15	242	98,13
Всього	8,48	-	-	676,26	-	2493,10	-	1638,00

Собівартість (повну) виготовлення інструменту розраховуємо за статтями витрат за допомогою отриманих на заводі кошторисних та звітних калькуляцій базових конструкцій. Розрахунок виконуємо за формулою:

$$C_{нов} = M_o + M_{\partial} + \Pi_n + T_v - B_{зв} + E_{tex} + \Pi_{tex} + З_{ор} + З_{\partial p} + B_c + B_{yn} + B_o + K_{цех} + K_{зав} + B_{ин} + K_{не} \quad (4.10)$$

де M_o – витрати на основні матеріали, грн.;

Π_n – покупні напівфабрикати, комплектуючі вироби та послуги інших підприємств, грн.

M_d – матеріали допоміжні, грн.;

T_p – транспортно-заготівельні витрати, грн.;

$B_{зв}$ – зворотні відходи, що реалізуються (віднімаються), грн.;

E_{tex}, Π_{tex} – енергія та паливо для технологічних цілей, грн.;

$З_{др}$ – додаткова заробітна плата виробничих робітників, грн.;

B_c – відрахування у соціальні фонди, грн.;

B_{yn} – відшкодування зносу інструменту та пристосувань цільового призначення та інші спеціальні витрати, грн.;

$K_{зав}, K_{пв}$ – загальнозаводські та позавиробничі витрати, грн.;

$B_{ін}$ – інші витрати, грн.

Розрахунок M_o та Π_n зводимо до таблиці 4.3.

Таблиця 4.3

Склад матеріальних витрат на виріб

№ з/п	Найменування	Одиниця	Витрати (шт, кг)	Ціна, грн.	Витрати на виріб, грн.
1.	Сталь 40Х	кг	6,7	44,50	298,15
2.	Сталь Р6М5	кг	6,2	345,00	2139,00
	Всього основні матеріали				2437,15

Розрахунок собівартості зводимо до таблиці 4.4.

Оптову ціну інструменту розраховуємо за формулою:

$$\Pi_{опт} = C_{пов} + \Pi_n \quad (4.11)$$

де Π_n – нормативний прибуток, грн.

$$\Pi_n = \frac{P_c \cdot C_{пов}}{100} \quad (4.12)$$

P_c – встановлений рівень рентабельності виробу, %.

$$\Pi_n = \frac{20 \cdot 10964,20}{100} = 2192,84 \text{ грн.}$$

$$\Pi_{опт} = 10964,20 + 2192,84 = 13157,00 \text{ грн.}$$

Виконані розрахунки зводимо до таблиці 4.4.

Таблиця 4.4

Повна собівартість виготовлення комбінованої протяжки та її оптова ціна

№ з/п	Стаття калькуляції	Позначення	Метод розрахунку, джерело інформації	Результат, сума, грн.
1.	Матеріали основні	M_o	табл. 4.3	2437,15
2.	Матеріали допоміжні	M_d	6% від M_o	97,49
3.	Покупні напівфабрикати, комплектуючі вироби та послуги інших підприємств	P_n	табл. 4.5	-
4.	Транспортно-заготівельні витрати	T_v	5% від $(M_o + M_d + P_n)$	101,39
5.	Зворотні відходи (віднімаються)	$B_{зв}$	5% від M_o	146,23
6.	Паливо та енергія на технологічні цілі	P_{tex}, E_{tex}	178,8% від $З_{op}$	1203,75
7.	Всього матеріальні витрати			3693,54
8.	Основна заробітна плата виробничих робітників	$З_{op}$	табл. 4.2	676,26
9.	Додаткова заробітна плата виробничих робітників	$З_{op}$	10% від $З_{op}$	67,63
10.	Відрахування у соціальні фонди	B_{cc}	22% від $(З_{op} + З_{op})$	163,66
11.	Відшкодування зносу інструменту та пристосувань цільового призначення	$З_{цп}$	22,0% від $З_{op}$	125,11
12.	Витрати на утримання та експлуатацію обладнання	B_o	табл. 4.2	2493,10
13.	Цехові витрати	$K_{цех}$	табл. 4.2	1638,00
14.	Загальнозаводські витрати	$K_{зав}$	285% від $З_{op}$	1927,35
15.	Інші виробничі витрати	$B_{ін}$	10,5% від $З_{op}$	71,01
16.	Виробнича собівартість інструменту	$C_{вир}$	Σст. 8÷16	10855,64
17.	Позавиробничі витрати	$K_{пв}$	1,0% від $C_{вир}$	108,56
18.	Повна собівартість	$C_{пов}$	$C_{вир} + K_{пв}$	10964,20
19.	Прибуток	P_n	20% від $C_{пов}$	2192,80
20.	Оптова ціна підприємства	$C_{опт}$	$C_{пов} + P_n$	13157,0

4.1.5. Визначення експлуатаційних витрат (собівартості обробки) – B_e , які припадають на одиницю продукції в базовому та проектному варіантах

Оскільки в базовому і в проектному варіанті використовується однакова модель верстата та продуктивність обробки співпадає, у порівнюваних варіантах

залишаються незмінними майже всі статті витрат, крім витрат на ріжучий інструмент.

Витрати на експлуатацію ріжучого інструменту:

$$B_{ip} = \frac{(S_u + pS_{пер}) \cdot \gamma T_{нор}}{t_e(p+1)} \kappa_{вт}, \quad (4.13)$$

де S_u – первісна вартість ріжучого інструменту, грн.;

p – кількість переточок різального інструменту до повного зносу по лімітуючому розміру різальної грані [55, табл. 7.12];

$S_{пер}$ – вартість однієї переточки, грн.;

γ – питоме значення машинного часу роботи обладнання в загальному варіанті його роботи [55, табл. 7.11];

t_e – економічна стійкість інструменту, хв. [55, табл. 7.12];

$\kappa_{вт}$ – коефіцієнт обліку втрати інструменту [55, табл. 7.12].

В базовому варіанті при використанні суцільної протяжки:

$$B_{ip}^{\sigma} = \frac{(14080 + 12 \cdot 23,01) \cdot 0,45 \cdot 0,5}{840 \cdot (12 + 1)} \cdot 1,1 = 0,2383 \text{ грн.}$$

В проєктному варіанті:

$$B_{ip}^{np} = \frac{(13157 + 15 \cdot 20,20) \cdot 0,45 \cdot 0,5}{1440 \cdot (15 + 1)} \cdot 1,1 = 0,1059$$

4.2. Розрахунок показників економічної ефективності

4.2.1. Річний економічний ефект, який отримує виробник протяжки розраховуємо за формулою:

$$E_{pv} = (C_{онт.пр} - C_{пов.пр}) \cdot \Pi_{\sigma} - E_n \cdot K_{\sigma}, \quad (4.14)$$

де $C_{онт.пр}$, $C_{пов.пр}$ – відповідно оптова ціна та повна собівартість проєктного інструменту, грн.;

Π_{σ} – програма виробництва інструменту, шт./рік;

E_n – нормативний коефіцієнт ефективності капітальних вкладень;

K_{σ} – додаткові капітальні витрати у виробника, грн.

Додаткові капітальні витрати у виробника складаються з витрат на конструкторську та технологічну підготовку виробництва інструменту:

$$K_e = B_{нк} \cdot B_m = 29131,47 + 31539,38 = 60670,85 \text{ грн.}$$

де $B_{нк}$, B_m – відповідно, вартість конструкторської та технологічної підготовки виробництва, грн.

$$E_{pv} = (13157,00 - 10964,20) \cdot 10 - 0,16 \cdot 60670,85 = 12221 \text{ грн.}$$

4.2.2. Річний економічний ефект, який отримує підприємство – споживач, розрахуємо за формулою:

$$E_{p.cn} = (B_e^{\delta} - B_e^{np}) \cdot N_{\delta} - E_n \cdot K_{cn}, \quad (4.15)$$

де K_{cn} – додаткові капітальні витрати у споживача, грн.

$$K_{cn} = C_i^{np} \cdot K_i^{np} - C_i^{\delta} \cdot K_i^{\delta}, \quad (4.16)$$

де C_i^{np} , C_i^{δ} – вартість інструменту відповідно в проектному та базовому варіантах;

K_i^{np} , K_i^{δ} – потреба в інструменті відповідно в проектному та базовому варіантах.

$$K_{cn} = 13157,00 \cdot 1 - 14080 \cdot 2 = -15003 \text{ грн.}$$

$$E_{p.cn} = (0,2383 - 0,1059) \cdot 50000 - 0,16 \cdot (-15003) = 9020 \text{ грн.}$$

4.2.3. Строк окупності додаткових капітальних вкладень у виробника:

$$T_{окв} = \frac{K_e}{(C_{опт.пр} - C_{пов.пр}) \cdot П_v} = \frac{60671}{(13157,00 - 10964,20) \cdot 10} = 2,8 \text{ років;}$$

4.3.5. В підсумку складаємо зведену таблицю техніко-економічні показників проекту (табл. 4.5).

Таблиця 4.6.

Підсумкові техніко-економічні показники проекту

№ п/п	Показник	Одиниця	Базовий варіант	Проект	Зміна, % (+, –)
1.	Потреба в інструменті	шт./рік	2	1	–50,0
2.	Річна програма виробництва деталей	шт./рік	50000	50000	–
3.	Річна програма виробництва інструменту	шт./рік		10	
3.	Штучний час протягування	хв.	0,5	0,5	–
4.	Собівартість (повна) виготовлення інструменту	грн.	–	10964,20	–
5.	Оптова ціна інструменту	грн.	14080	13157	-6,6
6.	Експлуатаційні витрати на ріжучий інструмент в розрахунку на одну деталь	грн.	0,2383	0,1059	–55,6
7.	Капітальні витрати на конструкторську та технологічну підготовку виробництва (у виробника)	грн.	–	60671	–
8.	Строк окупності додаткових капітальних вкладень у виробника	років	–	2,8	–
9.	Річний економічний ефект				
	– у виробника	грн.	–	12221	–
	– у споживача	грн.	–	9020	–

4.3. Організаційно-планові розрахунки

4.3.1. Розробка плану виконання комплексу робіт з підготовки виробництва.

Складання такого плану виконуємо з використанням сітьових методів планування ат організації виробництва.

Комплекс робіт, на який необхідно розробити оптимізований план представимо у вигляді сітьової моделі (рис. 4.1), Дані про тривалість виконання роботи та попередньо прийняту кількість виконавців зводимо до таблиці 4.7.

Таблиця 4.7

Дані про комплекс робіт з проектування інструменту

Номер роботи	Шифр роботи	Зміст роботи	Тривалість виконання, роб. дні	Кількість виконавців, осіб
1.	1-2	Розробка технічної пропозиції на проектування комбінованої протяжки	5-8	2
2.	2-3	Аналіз науково-технічної літератури	2-4	2
3.	2-4	Аналіз патентної літератури	6-8	3
4.	4-5	Дослідження конструкції протяжки	3-4	2
5.	5-6	Розрахунок параметрів протяжки	2-3	2
6.	5-7	Розробка методики проектування комбінованої протяжки	5-7	1
7.	6-7	Розрахунок геометрії і профілю інструменту	2-3	2
8.	7-8	Розробка конструкції інструменту	6-8	1
9.	8-9	Деталювання протяжки	1-2	1
10.	8-10	Аналіз технологічності протяжки	2-3	1
11.	8-13	Розробка карти налагодження	1	1
12.	8-18	Перевірка конструкції на патентну чистоту	5-7	2
13.	10-11	Розробка техпроцесу інструменту	1	1
14.	10-12	Розробка техпроцесу виготовлення деталей протяжки	2-3	2
15.	12-14	Розробка конструкції різця для обробки деталей протяжки	2-3	1
16.	12-15	Визначення розмірів шліфувального круга для шліфування профілю	1-2	1
17.	13-15	Перевірка конструкції на відповідність вимогам техніки безпеки	1-2	1
18.	14-15	Розрахунок розмірів профілю різця	1-2	1
19.	15-16	Перевірка креслень на технологічність	1	1
20.	15-17	Розробка відомостей специфікацій	1	1
21.	15-20	Виготовлення різця	1	1
22.	16-18	Нормоконтроль креслень	1	1
23.	17-18	Розрахунок показників економічності ефективності	2-3	1
24.	18-19	Передача комплекту документації на науково-технічну раду (НТР)	1	2
25.	19-20	Доробка документації за зауваженнями НТР	2-3	2
26.	20-21	Виготовлення дослідного зразка комбінованої протяжки	1	1

4.3.2. Визначення очікуваної тривалості робіт.

Тривалість робіт, яка визначається за нормативними або експертними оцінками, може задаватися однозначно або у вигляді мінімально ($t_{\min}$) та максимально ($t_{\max}$) можливих значень. Для таких робіт очікувану тривалість визначаємо за формулою:

$$t_{oc} = \frac{3t_{\min} + 2t_{\max}}{5}. \quad (4.17)$$

Округлені до цілих чисел значення t_{oc} , заносимо в гр. 4 таблиці 4.8, а також наносимо на вихідну сітьову модель (рис. 4.2). При цьому тривалість роботи вказують над стрілкою, кількість виконавців – під нею.

4.3.3. Розрахунок параметрів сітьового графіку.

До основних параметрів сітьового графіку відносяться ранні T_p та пізні строки здійснення подій, резерви часу подій P_n та робіт P_p , коефіцієнти напруженості κ_n , тривалість критичного шляху.

Ранній строк здійснення i -тої події визначається тривалістю максимального шляху від початкової події до даної. (гр. 2 таблиці 4.9).

Ранній строк здійснення кінцевої події дорівнює тривалості критичного шляху $L_{кр}$. В даному випадку він складає 43 робочих днів.

Пізні строки здійснення подій розраховуємо за наступною формулою, а отримані величини заносимо в гр. 3 таблиці 4.9.

$$T_{n(i)} = L_{кр} - L_{\max(i-c)}, \quad (4.18)$$

де $L_{\max(i-c)}$ – тривалість максимального шляху від даної i -тої події до кінцевої c -ої події.

Наприклад, пізній строк здійснення 3-ої події:

$$T_{n(3)} = 43 - 30 = 13 \text{ робочих днів.}$$

Резерви часу здійснення подій визначаємо за наступною формулою, отримані величини заносять в гр. 4 таблиці 4.9.

$$P_{n(i)} = T_{n(i)} - T_{p(i)}. \quad (4.19)$$

Наприклад:

$$P_{n(3)} = 13 - 9 = 4 \text{ робочих днів.}$$

Кількісна оцінка рівня напруженості некритичних робіт відносно робіт критичного шляху проводиться за допомогою коефіцієнтів напруженості робіт K_n . Цей коефіцієнт для робіт, які лежать на критичному шляху, дорівнює одиниці, а для фіктивних робіт він дорівнює нулю.

Для некритичних робіт коефіцієнт напруженості менше одиниці. Його визначають за формулою:

$$K_{n(i-k)} = \frac{L_{\max} - L_{kp.c}}{L_{kp} - L_{kp.c}}, \quad (4.20)$$

де $L_{\max}$ – тривалість максимального повного шляху, який приходить через дану роботу;

$L_{kp.c}$ – відрізок цього шляху, який співпадає з критичним шляхом.

Отримані величини K_n заносимо в гр. 8 таблиці 4.8.

Наприклад для роботи 2-3:

$$K_n = \frac{39 - 36}{43 - 36} = 0,43.$$

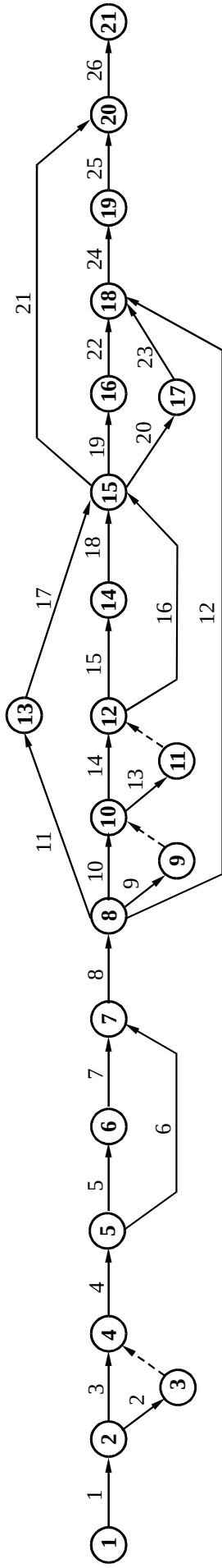


Рис. 4.1. Сітьова модель комплексу робіт

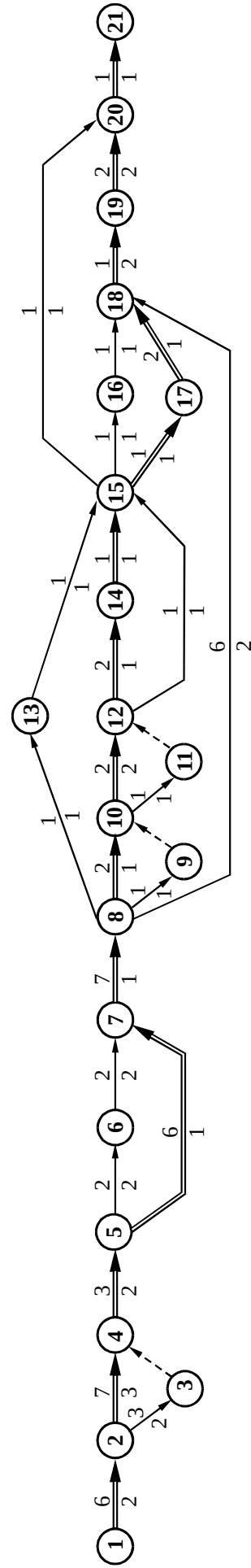


Рис. 4.2. Вихідний сітьовий графік, $L_{кр} = 43$ робочі дні.

Таблиця 4.9.

Параметри подій (робочі дні).

Шифр події	До оптимізації			Після оптимізації		
	T_p	T_n	P_n	T_p	T_n	P_n
1	0	0	0	0	0	0
2	6	6	0	6	6	0
3	9	13	4	12	12	0
4	13	13	0	12	12	0
5	16	16	0	15	15	0
6	18	20	2	17	19	2
7	22	22	0	21	21	0
8	29	29	0	28	28	0
9	30	31	1	29	30	1
10	31	31	0	30	30	0
11	32	33	1	31	32	1
12	33	33	0	32	32	0
13	30	35	5	29	34	5
14	35	35	0	34	34	0
15	36	36	0	35	35	0
16	37	38	1	36	37	1
17	37	37	0	36	36	0
18	39	39	0	38	38	0
19	40	41	0	39	39	0
20	42	42	0	41	41	0
21	43	43	0	42	42	0

4.3.4. Оптимізація сітьового графіку.

Для скорочення тривалості критичного шляху та забезпечення рівномірного завантаження виконавців, переведемо одного виконавця з роботи 2-3 відповідно на роботу 2-4. При переводі виконавців з однієї роботи на іншу, змінюється їх тривалість. Нова тривалість роботи:

$$t'_{оч(i-k)} = \frac{t_{оч(i-k)} \cdot K_{вук(i-k)}}{K'_{вук(i-k)}}, \quad (4.21)$$

де $t_{оч(i-k)}$, $K_{вук(i-k)}$ – відповідно очікувана тривалість роботи (i-k), та кількість її виконавців до оптимізації;

$K'_{вук(i-k)}$ – кількість виконавців, яка запланована для виконання роботи (i-k), після їх перерозподілу.

Наприклад, для роботи 2-4 після перерозподілу виконавців нова тривалість:

$$t'_{оч(2-4)} = \frac{7 \cdot 3}{4} = 5 \text{ робочих днів.}$$

Отримані нові значення очікуваної тривалості робіт і їх виконавців записуємо в гр. 5 і 7 таблиці 4.8 і наносимо на сітьовий графік. Такий графік зображено на рис. 4.3, а розрахунки його параметрів – у відповідних графах таблиць 4.8-4.9. Як свідчать розрахунки, тривалість критичного шляху сітьового графіку після оптимізації складає 42 робочих днів. В порівнянні з вихідним графіком вона скоротилася на 1 робочий день.

4.3.5. Розробка карти проекту.

Для досягнення мінімізації потреби в одночасно необхідних виконавцях будують так звану карту проекту. При цьому сітьовий графік перетворюємо в лінійний і створюємо діаграму зайнятості виконавців (рис. 4.4).

Як видно з побудованої діаграми, потрібна кількість виконавців коливається від 1 до 5 чоловік. Зменшити потрібну кількість виконавців і раціонально їх завантажити в окремі проміжки часу можливо за рахунок переміщення вправо некритичних робіт, що мають резерви часу. Для цього змістимо роботи 9-10, 12-15, 13-15, 15-20 вправо, в межах їх резервів, що дає можливість зменшити у певні проміжки часу максимальну кількість виконавців. Нове положення робіт на графіку та діаграмі зображено суцільною лінією. А початкове положення цих робіт – пунктиром.

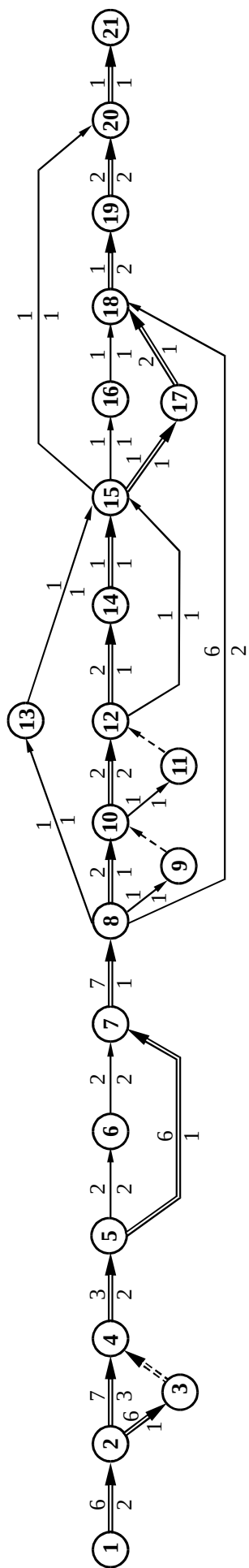


Рис. 4.3. Оптимізований сітьовий графік, $L_{кр} = 42$ робочі дні.

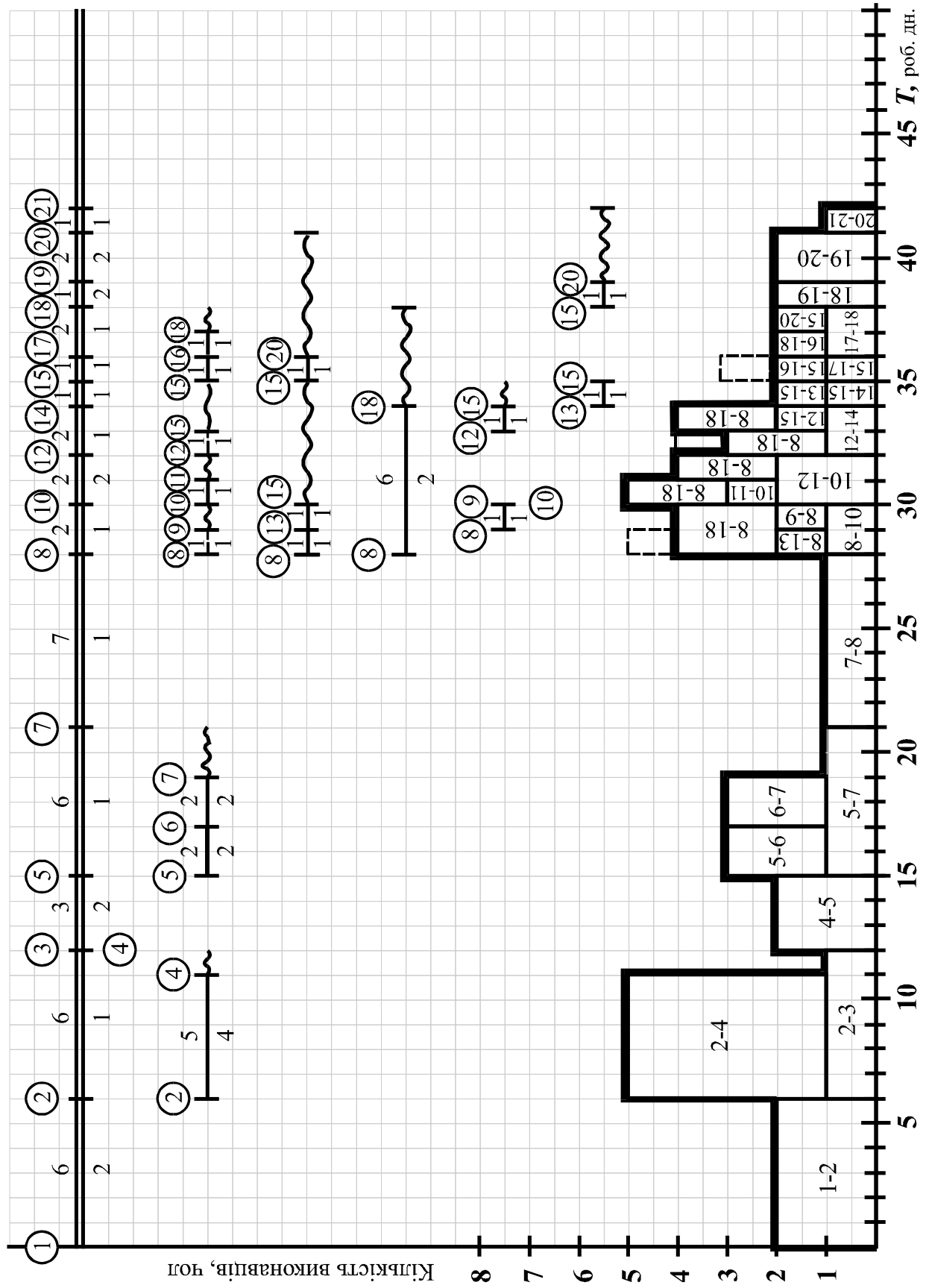


Рис. 4.4.4. Карта проекту: а) лінійний графік комплексу робіт; б) діаграма завантаження виконавців

4.3.6. Оцінка можливих відхилень тривалості критичного шляху

Тривалість ряду робіт, які лежать на критичному шляху, задана ймовірними оцінками, а розрахунок шляхів виконано за середніми значення. В результаті фактична тривалість критичного шляху може виявитися більше або менше розрахованої.

Встановлення максимальної та мінімальної тривалості критичного шляху визначається із врахуванням середньоквадратичного відхилення. Для цього спочатку розраховуємо дисперсії тривалості виконання робіт, які лежать на критичному шляху, за формулою:

$$\sigma_{(i-k)}^2 = 0,04(t_{\max(i-k)} - t_{\min(i-k)})^2 \quad (4.22)$$

Результати розрахунків заносимо в гр. 10 таблиці 4.8.

Наприклад, дисперсія тривалості роботи 1-2:

$$\sigma_{(1-2)}^2 = 0,04(8 - 5)^2 = 0,36 \text{ робочих днів.}$$

Середньоквадратичне відхилення тривалості критичного шляху:

$$\sigma_{kp} = \pm \sqrt{\sum \sigma_{(i-k)}^2} = \pm \sqrt{1,12} = 1 \text{ робочий день.}$$

З врахуванням розрахованого відхилення планова тривалість критичного шляху складає:

$$L_{kp} = 42 \pm 1 \text{ робочі дні.}$$

ВИСНОВКИ

1. У якості універсального критерію оброблюваності високопластичних сталей доцільно використовувати кут нахилу площини зсуву, збільшення якого однозначно свідчить про поліпшення оброблюваності та навпаки. Якісно про зміну кута нахилу площини зсуву можна судити за значенням усадки стружки та шорсткості.

2. Змінюючи передній кут, кут дії та ступінь попереднього зміцнення, можна управляти оброблюваністю високопластичних матеріалів.

3. Підвищення ступеня попереднього зміцнення металу сприяє зменшенню усадки стружки, сил різання, висоти мікронерівностей, довжини контакту стружки з передньою поверхнею різця. Застосовуючи попереднє пластичне деформування можна до 40 % збільшити довжину протягування за інших рівних умов у порівнянні з незміцненим металом.

4. Оброблюваність високопластичних сталей можна підвищити шляхом впливу на кут дії шляхом застосування змащувально-охолоджувальних рідин. Найкращі результати виходить при використанні ЗОР на мастильній основі. Змінюючи довжину контакту стружки з передньою поверхнею інструмента можна змінити діаметр завитка стружки, тому що між ними існує однозначний зв'язок, що описується відповідною залежністю.

5. Збільшення переднього кута до значень 30-40° в залежності від режимів обробки й властивостей оброблюваного матеріалу веде до поліпшення характеристик оброблюваності високопластичних матеріалів. Подальше збільшення переднього кута погіршує оброблюваність. Це пояснюється втратою різальним клином радіальної твердості.

6. Застосування швидкостей різання в межах 0,125-0,200 м/с викликає погіршення характеристик оброблюваності високопластичного металу, що пов'язано з виникненням у вказаному діапазоні швидкостей явища наростоутворення та стабільного наросту на передній поверхні інструмента, особливості форми якого значно зменшують величину переднього кута при товщині зрізу, характерній для ріжучого протягування. Тому на операцію обробки

протягуванням не рекомендовано призначати швидкості різання в межах 0,125-0,200 м/с.

7. Керування оброблюваністю високопластичних сталей можна здійснювати шляхом зміни кута нахилу площини зсуву. Запропонована схема взаємозв'язку кута нахилу площини зсуву з елементами процесу різання. Найбільший вплив на зміни нахилу площини зсуву здійснює передній кут, фізико-механічні властивості оброблюваного матеріалу та тип ЗОР. Запропонована схема дає можливість визначити, якими факторами доцільно управляти для підвищення оброблюваності високопластичних сталей.

8. Попереднє холодне пластичне деформування й збільшення переднього кута знижують інтенсивність протікання цих процесів. Попереднє холодне зміцнення втулки трохи знижує стійкість ріжучої частини протяжки й приводить до різної твердості по товщині стінки. Отже, для підвищення стійкості зубів протяжки це необхідно враховувати шляхом вибору кількості зубів протяжки, схеми різання, а також розподілу припуску між чорновими й чистовими зубами.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Белов В.С., Иванов Г.М. Анализ факторов, влияющих на условия резания и стойкость протяжного инструмента.– Станки и инструмент. 1974, № 11.– С. 31-33.
2. Берлинер М.С. Процессы протягивания деталей на ЗИЛе. В сб.: Новые протяжные станки и прогрессивные методы протягивания [Текст] / М.С. Берлинер, М., НИИМАШ, 1966, с. 8-14.
3. Бобров В.Ф. Основы теории резания металлов [Текст] / В.Ф. Бобров - М., Машиностроение, 1975, - 344 с.
4. Виноградов А. А. Расчет усадки стружки и длины контакта ее с резцом [Текст]. - Сверхтвердые материалы, 1980, № 2,– С. 58-63.
5. Горецкая З.Л. Протягивание с большими подачами. [Текст] / З.Л. Горецкая - М.: Машгиз, 1960, - 76 с.
6. Грановский Г.И. Расчет и конструирование протяжек. – М., Машгиз, 1960, – 252 с.
7. Єрьомін П.М. Підвищення ефективності обробки отворів в деталях із чавунів комбінованим протягуванням: автореф. дис. на здобуття ступеня канд. техн. наук спец. 05.03.01 «Процеси механічної обробки, верстати та інструмент» / П.М. Єрьомін – Кіровоград, 2015. – 24 с.
8. Жигалко Н.И. Стружкообразование и минимальная величина коэффициента заполнения при протягивании жаропрочных сплавов с повышенными скоростями резания. – В кн.: Машиностроение и приборостроение. Межвед. сб. № 9,– Минск, Вишэйшая школа, 1977, с. 47-51.
9. Кацев П. Г. Обработка протягиванием / П. Г. Кацев. – М. : Машиностроение, 1986. – 272 с.
10. Кодрик А.И. Некоторые вопросы обрабатываемости высокопластичной стали 10ГН применительно к режущему протягиванию. – В кн.: Сверхтвердые материалы. Пр-во и применение. Киев, ИСМ АН УССР, 1977, с. 131-137

11. Кочетков Я.П. Построение осциллограмм радиальных деформаций от одного зуба при внутреннем протягивании. – Изд-во вузов, «Машиностроение» 1972, № 9.– С.145-149.
12. Кретинин О.В., Денисенко А.В., Кварталов А.Р. Ускоренная методика оценки относительной обрабатываемости. - В кн.: Боа-росы теории трения, смазки и обработ. металлов. Сб.статей, Чебоксары, 1972,– С. 72-80.
13. Курчик Н.И. Вейншток В.В., Шехтер Ю.Н. Смазочные материалы при обработке металлов резанием. - М., Химия, 1972, - 312 с.
14. Кушнер В.С., Губнин Н.И., Браилов И.Г. Повышение эффективности точения труднообрабатываемых сплавов и сталей за счет выбора рациональной формы режущей части инструмента. Перспективы развития режущего инструмента и повышение эффективности его применения в машиностроении. Сб. статей, М., ВНИИ, 1978,– С.434-437.
15. Маркин Е.А. Вынужденные колебания при протягивании. Станки и инструмент» 1967, № 2.– С. 36-37.
16. Методи поверхневого зміцнення у процесі виготовлення деталей машин [Текст]: навч. посіб. / А.Г.Фесенко та [ін.]– Д.: РВВ ДНУ, 2015. – 104 с.
17. Опір матеріалів: Підручник / Г.С. Писаренко, О.Л. Квітка, Е.С. Уманський; За ред. Г.С. Писаренка.– 2-ге видання, допов. і переробл.– К.: Вища шк., 2004. – 655 с.
18. Основи теорії різання матеріалів: підручник / М. П. Мазур [та ін.]; під ред. М. П. Мазура. – Львів : Новий Світ. – 2000, 2010. – 422 с.
19. Пат. на винахід 23465 А Україна, МПК В23D 43/00. Деформуюче-ріжуча протяжка / О. В. Чернявський, О. О. Чернявський, С. Г. Лопатенко. - заявник і патентовласник Кіровоград. ін-т с.-г. машинобуд. - № 96124919 ; заявл. 27.12.1996 ; опубл. 31.08.1998 ; Бюл. № 4. - 3 с. : іл.
20. Пат. на корисну модель 124157 Україна, МПК В23D 43/00. Збірна деформуюча протяжка / Я. Б. Немировський, О. В. Чернявський, І. В. Шепеленко, Е. К. Посвятенко, П. М. Єрьомін, С. Є. Шейкін. - заявник і патентовласник Кіровоград. нац. техн. ун-т. - № u201709842 ; заявл. 11.10.2017 ; опубл. 26.03.2018 ; Бюл. № 6. - 4 с. : іл.

21. Пат. на корисну модель 124867 Україна, МПК В23D 43/00. Протяжка / О. В. Чернявський, І. В. Шепеленко, Е. К. Посвятенко, Я. Б. Немировський, О. Д. Сіренко, П. М. Єрьомін, О. О. Чернявський. - заявник і патентовласник Центральноукраїн. нац. техн. ун-т. - № u201711064 ; заявл. 13.11.2017 ; опубл. 25.04.2018 ; Бюл. № 8. - 3 с. : іл.

22. Пат. на корисну модель 24629 Україна, МПК В23D 43/00. Спосіб деформуючого протягування / В. М. Пестунов, О. В. Чернявський, П. М. Єрьомін. - заявник і патентовласник Кіровоград. нац. техн. ун-т. - № u200701317 ; заявл. 08.02.2007 ; опубл. 10.07.2007 ; Бюл. № 10. - 2 с. : іл.

23. Пат. на корисну модель 30415 Україна, МПК В23В 47/00. Спосіб деформуючого протягування / О. В. Чернявський, П. М. Єрьомін. - заявник і патентовласник Кіровоград. нац. техн. ун-т. - № u200712200 ; заявл. 05.11.2007 ; опубл. 25.02.2008 ; Бюл. № 4. - 2 с. : іл.

24. Пат. на корисну модель 44522 Україна, МПК В23D 43/00. Секція деформуючо-різальної протяжки / О. В. Чернявський, П. М. Єрьомін. - заявник і патентовласник Кіровоград. нац. техн. ун-т. - № u200903236 ; заявл. 06.04.2009 ; опубл. 12.10.2009 ; Бюл. № 19. - 2 с. : іл.

25. Подураев В.Н. Резание труднообрабатываемых материалов. М., Высшая школа, 1974 – 590 с.

26. Полетина М. Ф. Контактные нагрузки на режущих инструментах. – М., Машиностроение. 1967. - 150 с.

27. Посвятенко Э.К., Кодрик А.И. Особенности режущего протягивания стали 10ГН. – В кн.: Физические явления при деформирующем протягивании и резании пластичных металлов. Киев, 1978, с. 144-148.

28. Промптов А.И., Миндлин С.А, Влияние смазочно-охлаждающих жидкостей на площадь контакта стружки с передней поверхностью инструмента. - В кн.: Исследование технологических процессов в машиностроении. Иркутск, Иркутский политехнический институт, 1969, С. 35-45.

29. Пронкин Н. Ф. Протягивание труднообрабатываемых материалов.— М.: Машиностроение, 1978. – 119 с.

30. Протяжки для обработки отверстий / Д.К. Маргулис, М.М. Тверской, В.Н. Ашихмин и др. – М.: Машиностроение, 1986. – 232 с.
31. Развитие науки о резании металлов / Под ред. Н. Н. Зорева и др. – М.: Машиностроение, 1967. – 416 с.
32. Расчет и проектирование твердосплавных деформирующих протяжек и процесса протягивания / А.М. Розенберг, О.А.Розенберг, Э.К. Посвятенко и др. - Киев, Наукова думка, 1978, – 255 с.
33. Резников Н.И. Методы оценки обрабатываемости металлов резанием, основанные на исследовании их физико-механических свойств и параметров процесса резания металлов. В сб. «Высоко-производительное резание в машиностроении». М.: Наука. 1966, с. 71-76.
34. Різальний інструмент [Електронний ресурс] : навч. посіб. для студ. спеціальності 131 «Прикладна механіка», спеціалізації «Технологія машинобудування» / КПІ ім.Ігоря Сікорського ; уклад.: Л.М. Данилова, С.В. Лапковський, В.П. Приходько – Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2023. – с. 147
35. Розенберг А. М. Механика пластического деформирования в процессах резания и деформирующего протягивания / А. М. Розенберг, О. А. Розенберг; отв. ред. П. Р. Родин. – К. : Наук. думка, 1990. – 320 с.
36. Розенберг О. А. Механика взаимодействия инструмента с изделием при деформирующем протягивании / О. А. Розенберг. – К. : Наук. думка, 1981.– 288 с.
37. Студенець, С. Ф. Вплив умов деформування при обробці твердосплавними комбінованими протяжками на структуру та зміцнення поверхневого шару чавунів [Текст] / С. Ф. Студенець, П. М. Єрьомін, О. В. Чернявський // Сверхтвердые материалы, - 2015, - № 4. - С. 91-99
38. Холявко В .В. Фізичні властивості та методи дослідження матеріалів [текст]: навчальний посібник для студентів галузі знань 13 – Механічна інженерія спеціальності 132 – Матеріалознавство денної та заочної форм навчання / В. В. Холявко, І. А. Владимирський, О. О. Жабинська. – Київ: Центр учбової літератури, 2016. – 156 с.

39. Щеголев А. В. Конструирование протяжек [Текст] // М. : Машгиз, 1960. – 282 с.
40. Axinte D. A. and Gindy N., “Tool condition monitoring in broaching,” *Journal of Wear*, vol. 254, no. 3-4, pp. 370-382, 2003 [https://doi.org/10.1016/S0043-1648\(03\)00003-6](https://doi.org/10.1016/S0043-1648(03)00003-6)
41. Raghavendra Kamath Cholpadi and Appu Kuttan «Mechanistic Force Modeling for Broaching Process» / February 2014 *International Journal of Manufacturing Engineering* 2014(10): 1-10 [Text] / Research Article | Open Access Volume 2014 |Article ID 485712 | <https://doi.org/10.1155/2014/485712>
42. Tool wear monitoring of high-speed broaching process with carbide tools to reduce production errors 2022, *Mechanical Systems and Signal Processing* <https://doi.org/10.1016/j.ymssp.2022.109003>