



ТЕХНИЧЕСКИ УНИВЕРСИТЕТ – СОФИЯ
ФИЛИАЛ ПЛОВДИВ

ФАКУЛТЕТ МАШИНОСТРОЕНЕ И УРЕДОСТРОЕНЕ
КАТЕДРА МАШИНОСТРОИТЕЛНА ТЕХНИКА И ТЕХНОЛОГИИ

маг. инж. Гюнюл Джемал Караджа

ТЕХНОЛОГИЧНО ОСИГУРЯВАНЕ НА ТОЧНОСТТА И
ПРОИЗВОДИТЕЛНОСТТА НА КОМБИНИРАНО
ОБРАБОТВАНЕ НА ОТВОРИ ОТ ХИДРО- И
ПНЕВМОЦИЛИНДРИ

АВТОРЕФЕРАТ

на

дисертационен труд

за придобиване на образователна и научна степен „доктор”

Област на висше образование: 5. Технически науки

Професионално направление: 5.1. Машинно инженерство

Докторска програма: Технология на машиностроенето

Научен ръководител:

доц. д-р инж. Ангел Ленгеров

Пловдив

2026

Дисертационният труд е обсъден и насочен за защита от Катедрения съвет на Катедра „Машиностроителна техника и технологии“ към Факултет „Машиностроене и уредостроене“ на ТУ – София, Филиал Пловдив на заседание, състояло се на 05.12.2025г.

Публичната защита на дисертационния труд ще се състои на 02.04.2026 г. от 15:00ч. в зала 3206 на ТУ – София, Филиал Пловдив на открито заседание на научното жури в състав:

1. проф. д-р инж. Вълчо Николов Николов – председател
2. доц. д-р инж. Райчо Петров Райчев – научен секретар
3. проф. д-р инж. Снежина Ангелова Андонова
4. проф. д-р инж. Галина Иванова Николчева
5. доц. д-р инж. Иван Маринов Амуджев

Рецензенти:

Дисертантът е редовен докторант към катедра „Машиностроителна техника и технологии“ на Факултет „Машиностроене и уредостроене“ на ТУ - София, Филиал Пловдив. Изследванията по дисертационната разработка са направени от автора, като някои от тях са подкрепени от научноизследователски проекти.

Материалите по защитата са на разположение на проявилите интерес във факултетната канцелария на Факултет „Машиностроене и уредостроене“ на ТУ - София, Филиал Пловдив, кабинет 4239.

Автор: маг. инж. Гюнюл Джемал Караджа

Заглавие: Технологично осигуряване на точността и производителността на комбинирано обработване на отвори от хидро- и пневмоцилиндри

А. ОБЩА ХАРАКТЕРИСТИКА НА ДИСЕРТАЦИОННИЯ ТРУД

Главна предпоставка за увеличаване на обществената производителност на труда е научно-техническият прогрес. Ето защо основна задача на всяка научно-изследователска, проектно-конструкторска и внедрителска дейност се свежда до постигане на максимална производителност и високи качествени показатели при минимални разходи на труд, време и средства.

Механичното обработване на детайлите на настоящия етап и в близко бъдеще остава основно за машиностроенето. При обработването на отвори чрез рязане широко приложение са намерили процесите разстъргване за грубото и чистото обработване и повърхностното пластично деформиране (ППД) за довършващо обработване. Те осигуряват високи качествени показатели на получения отвор и ниска себестойност на обработването.

Непрекъснатото повишаване на изискванията към качеството на обработените отвори и производителността налага интензивна научно-изследователска и внедрителска дейност, насочена към комбинираното обработване чрез рязане и ППД. Създадените досега комбинирани инструменти за обработване на отвори не са намерили достатъчно приложение в практиката поради липса на производствен опит, непълното систематизиране на постигнатите резултати и тяхното популяризиране.

В това направление е необходимо да се насочат усилията към разработване на нови конструкции прогресивни комбинирани инструменти, осигуряващи едно проходно обработване.

Предварителните проучвания дават основание да се счита, че тези инструменти осигуряват високо качество на обработените с тях повърхнини, при висока производителност на труда.

Основна цел на дисертационния труд: Теоретично и експериментално изследване на процеса комбинирано обработване на отвори с цел оптимизиране на решенията за съвместяване на процесите разстъргване и ППД, осигуряващи висока производителност и качеството на повърхнините.

Научна новост: Изследвано е влиянието на режимите на обработка при комбинирано обработване на отворите върху качествените показатели на повърхнините.

Практическа полезност и приложимост: От изведените аналитични и графични модели могат да определят оптималните технологични параметри на процеса на комбинирано обработване на отвори от хидро- и пневмоцилиндри.

Апробация на работата: Дисертационният труд е докладван и обсъден на заседание на катедра „Машиностроителна техника и технологии“ при ТУ – София, Филиал Пловдив. Етапи от Дисертационната работа са докладвани и обсъждани на:

- Младежки форум „Наука, технологии, иновации, бизнес“, есен, Пловдив, 21-22.11.2024г.
- Национална конференция „Машиностроене и машинознание“ Дни на механиката във Варна, 08-10.09.2025 г.
- Младежки форум „Наука, технологии, иновации, бизнес“, есен, Пловдив, 17-21.11.2025г.

Публикации: По темата на дисертацията са публикувани 2 научни статии, отпечатани в национални списания, и 2 научни доклада. 1 научна статия и 1 научен доклад са приети за печат.

Структура и обем на дисертационния труд: Дисертационният труд съдържа увод, пет глави, общи изводи, литература и съдържание в общ обем от 112 страници.

Б. КРАТКО ИЗЛОЖЕНИЕ НА ДИСЕРТАЦИОННИЯ ТРУД

ГЛАВА ПЪРВА ЛИТЕРАТУРЕН ОБЗОР

1.1. Класификация на инструментите за комбинирано обработване на цилиндрични отвори чрез рязане и повърхностно пластично деформиране.

Идеята за комбинирано обработване чрез рязане и повърхностно пластично деформиране (ППД) не е нова. Първите опити и публикации за това датират от четиридесетте години на нашето столетие [46].

През следващите десетилетия се наблюдава повишен интерес, разширяване и задълбочаване на изследванията за изучаване на явленията, свързани с обработването чрез ППД. На този проблем са посветени редица разработки [29, 50, 56]. Поставя се началото и на фирмено производство на инструменти за ППД, като типичен представител е фирмата *Hegenscheidt*.

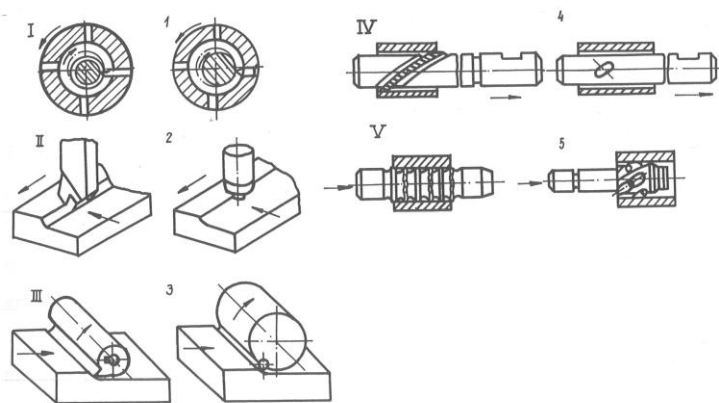
Интересът към обработването чрез ППД се обуславя от следните положителни страни на метода:

Притежава изключителна ефективност. По същество той се числи към довършващите методи за обработване, като осигурява качество на обработените повърхнини от $R_a = 0,63 \mu m$ до $R_a = 0,08 \mu m$.

Обработването чрез ППД може да се извърши на същите машини, на които се извършва и предварителното обработване на детайлите чрез рязане.

Двата метода са кинематично и размерно съвместими.

Възможните методи са обединени в шест класа (фиг. 1.1).



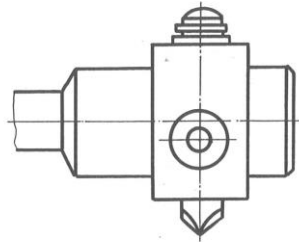
Фиг. 1.1. Класификация на методите за формообразуване при обработване чрез рязане и еквивалентни схеми за обработване чрез ППД. (I-V - рязане; 1-5 - повърхностно пластично деформиране) [29].

1.2. Анализ на известни конструкции и инструменти за съвместяване обработването на отвори чрез рязане и ППД.

За пръв път комбинираното обработване на цилиндрични отвори чрез разстъргване и ППД е описано в [46].

Схемата на комбинирания инструмент е показана на фиг.1.2.

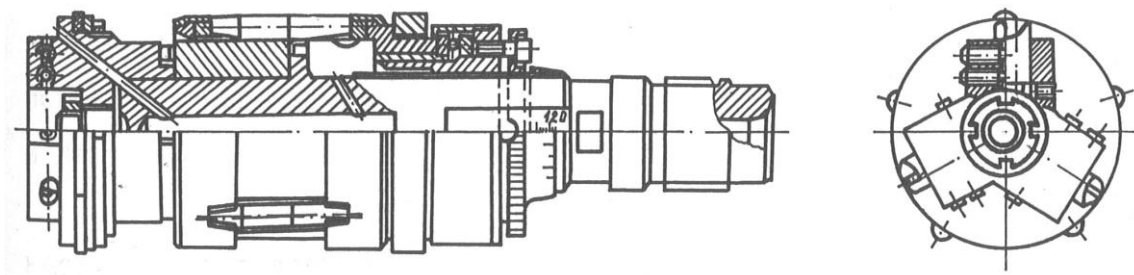
Разстъргващият нож и деформацияният елемент - сачма, сглобена в специален регулируем сепаратор, са разположени на 180°.



Фиг.1.2. Схема на комбиниран инструмент за разстъргване и ППД [46]

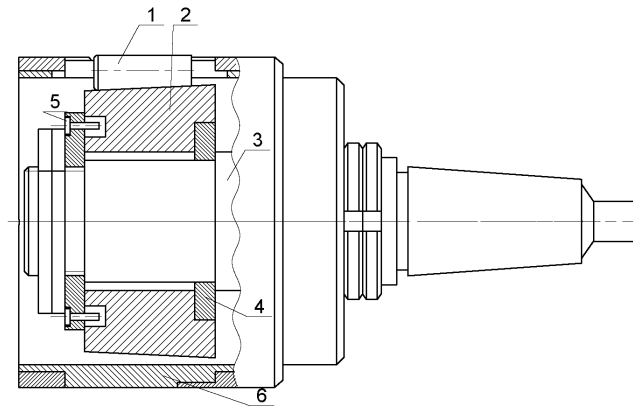
Голяма е групата на комбинираните инструменти, при които както режещият, така и деформацияният елемент имат твърда връзка с корпуса на инструмента [28, 40, 70].

Схема на инструмент от тази група е показан на фиг. 1.4 [40]. В корпуса са закрепени от 1 до 3 режещи елемента. Върховете им се заточват на необходимия размер със специално приспособление в сглобено състояние. При установяване на два и повече ножа те работят по метода на делене на подаването. С това се цели да се приведе в съответствие подаването за режещата и деформацияната част.



Фиг. 1.4. Комбиниран инструмент с твърда връзка на режещия и деформацияния елемент [40].

На фиг. 1.6 е показан диференциален инструмент с твърдо действие.



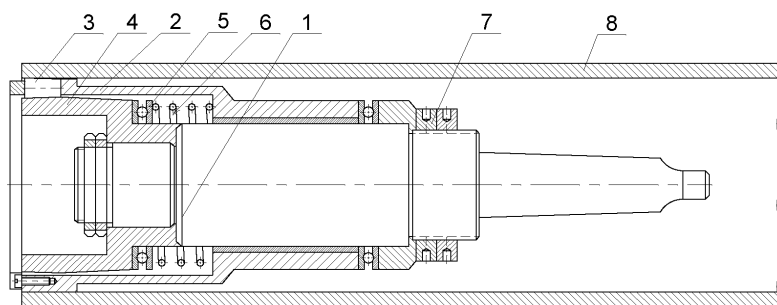
Фиг. 1.6. Диференциален инструмент с твърдо действие:
 1 – ролка; 2 – опорен конус; 3 – дорник; 4 – аксиален лагер; 5 – щифт;
 6 – сепаратор

По-съвършени в сравнение с гореописаните инструменти са сепараторните копиращи валцовки с понижена твърдост. При промяна размера на отвора на заготовката по дължина, грешката в геометричната форма (конусност, овалност и др.), биенето на детайла и инструмента и силата на натяга по време на ППД се променят.

Копиращ инструмент за обработка на отвори

На фиг.1.7 е показана копиращ инструмент за обработка на отвори.

Копиращите инструменти осигуряват получаването на качествена повърхнина, но не коригира грешката в нейните размери.



Фиг. 1.7. Копиращ инструмент за обработка на отвори:
 1 – дорник; 2 – сепаратор; 3 – деформираща ролка; 4 – опорен конус;
 5 – аксиален лагер; 6 – пружина; 7 – гайка; 8 – обработваем детайл

1.3. Качество на обработените с комбинирани инструменти цилиндрични отвори.

1.3.1. Точност на размерите и макрогеометричната форма. Качествени показатели на повърхностния слой след обработка чрез ППД

Структура на повърхностния слой – Интензивната пластична деформация провокира процес на раздробяване на кристалите в повърхностния слой.

Отклонение от формата - ППД може да се реализира като неразмерен, условно-размерен и размерен процес.

Микрогеометрия – при ППД се наблюдава намаляване на височинните параметри и подобряване на формата на грапавините.

Уякчаване – В повечето случаи ППД представлява *вторично уякчаване* на вече уякчен слой метал от предшестващото обработване. По тази причина, се постига *по-голямо уякчаване спрямо предходни операции (стружкоотнемане и шлайфане и др.)*[9].

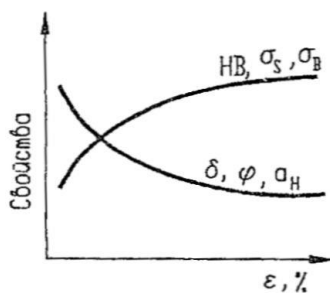
Остатъчни напрежения (ОН) – ОН в повърхностния слой метал са напрежения на опън и натиск.

1.3.2. Физико-механични свойства на повърхнините, обработени с комбинирани инструменти.

Уякчаване на повърхностния слой чрез ППД

Уякчаването се оценява в дълбочина и в степен. Дълбочината се определя от дебелината на слоя с повишена твърдост, а степента на уякчаване с K_y се определя чрез нарастване на микротвърдостта.

На фиг.1.19 е изразена промяната в свойствата на метали при ППД.



Фиг. 1.19.

Степента на уякчаване се изразява в следния вид:

$$K_y = \frac{H_{\mu}}{H_{\mu\text{изх}}} \cdot 100 \% , \quad (1.2.)$$

1.4. Изводи от литературния обзор. Цел и задачи на дисертационната работа.

Проучването на резултатите в областта на комбинираното обработване на цилиндрични отвори чрез рязане и ППД дава основание да се направят следните изводи:

Комбинираното обработване на цилиндрични отвори чрез рязане и ППД е подходящо за прилагане в практиката поради високите си технико-икономически показатели: осигуряване високо качество и надеждност на обработваните повърхнини при голяма производителност; съкращаване на технологичния маршрут; намаляване броя на необходимите машини и производствени работници; подобряване на условията на труда.

За постигане на основната цел трябва да се решат следните задачи:

- Да се проведе анализ на известните методи и устройства за обработка на гладки цилиндрични отвори с комбинирани инструменти.
- Да се разработят технологичните основи на еднопроходното обработване.
- Да се проведат експериментални изследвания на микрорелефа и микротвърдостта на обработваните повърхнини. На тази база да се изведат регресионните модели на същите.
- Да се изследва работоспособността на предложените решения в производствени условия и се даде заключение за тяхната ефективност.

ГЛАВА ВТОРА.

АНАЛИТИЧНО ОПРЕДЕЛЯНЕ НА ГЕОМЕТРИЧНИТЕ И МЕХАНИЧНИ ПАРАМЕТРИ НА ПОВЪРХНОСТНИЯ СЛОЙ ПРИ ОБРАБОТВАНЕ НА ОТВОРИ ЧРЕЗ ППД

2. Технологични параметри, оказващи влияние на микрорелефа и микротвърдостта на повърхнини, обработвани чрез рязане и ППД.

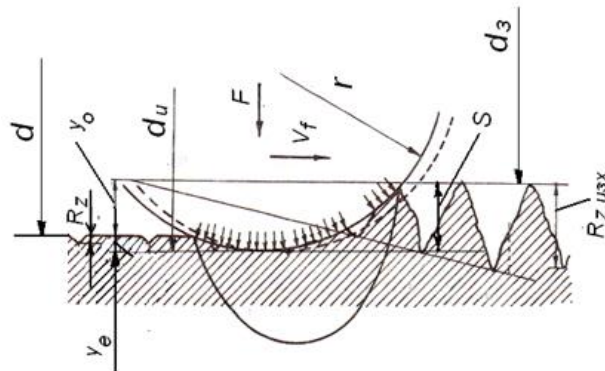
2.2.1. Формиране на микрогеометрията на повърхностния слой

В съответствие с [39, 40] общият вид на зависимостите за определяне на височините на грапавините при окончателно-уякчаващо обработване чрез ППД са изразяват така:

$$R_z = h_1 + h_2 + h_3 \quad , \quad (2.5.)$$

където:

- съставляващата h_1 се обуславя от геометрията и кинематиката на преместването на инструмента;
- h_2 се определя от големината на пластичната деформация на неравностите на грапавините;
- h_3 е грапавостта на работната повърхнина на инструмента.



Фиг. 2.1 Схема на деформиране на неравностите при ППД, където r - профилният радиус на инструмента; F - сила на деформиране; v - направление на подаването

При деформирането неравностите по върховете на горната част на материала практически се разпределят равномерно в падините на повърхността.

2.2.2. Определяне на параметрите на профила на грапавините при ПД

$$Av = Av' \quad (2.10.)$$

Площта на материала, изместен от върха на грапавината Av (фиг. 2.2) се определя изхождайки от геометрични съображения по зависимостта:

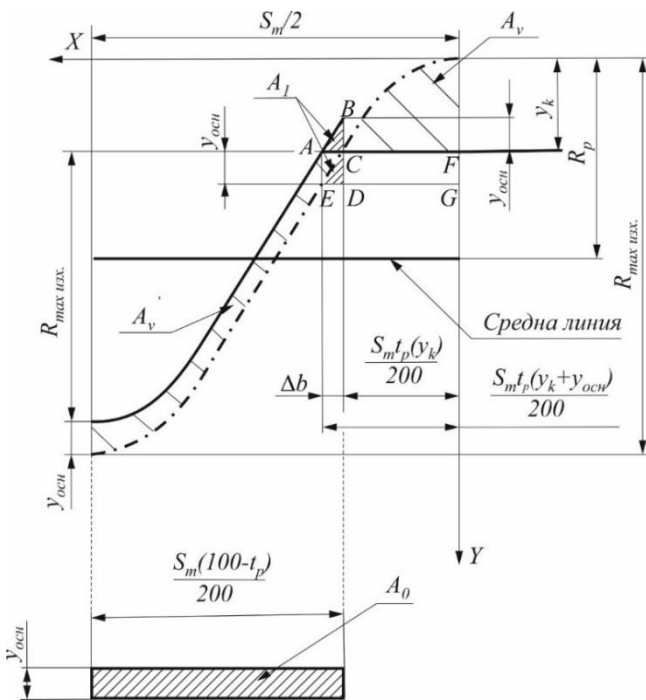
$$Av = \int_0^{y_{nl}} \frac{S_m \cdot t_m}{200} \left(\frac{y_k}{R_p} \right)^v dy \quad (2.11.)$$

След интегриране, получаваме:

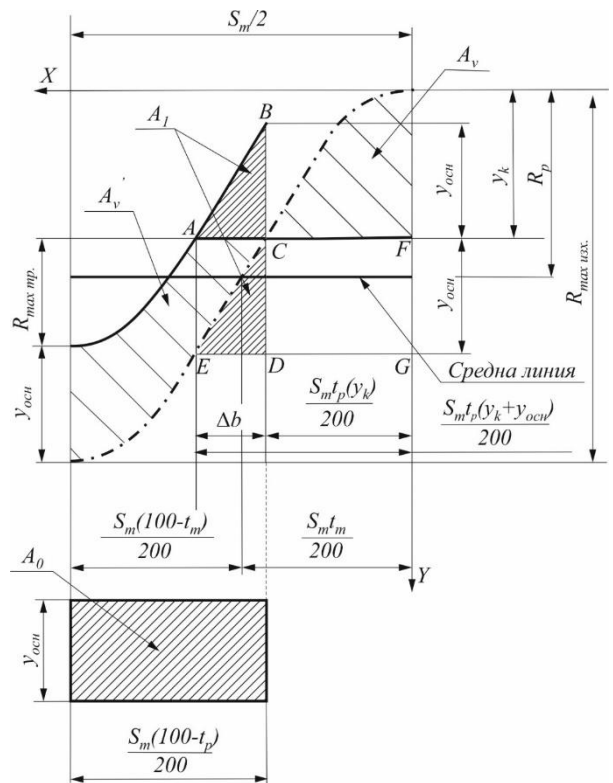
$$Av = \frac{S_m \cdot t_m}{200 R_p^v} \left(\frac{y_k}{v+1} \right)^{v+1} \quad (2.12.)$$

Площта A_1 се определя от равенствата на триъгълниците ABC и CDE както и разликата на площите на фигура $CFGE$ и правоъгълника $CFGD$ (фиг. 2.2, фиг. 2.3):

$$A_1 = A_{CFGE} - A_{CFGD} \quad (2.20.)$$



Фиг. 2.2. Схема за пресмятане на параметрите на грапавините при големина на y_k по-малка от преходната



Фиг. 2.3. Схема за пресмятане на параметрите на грапавините при големина на y_k по-голяма от преходната

В първия случай (фиг. 2.2), площта на фигура $CFGE$ се определя по зависимостта:

$$A_{CFGE} = \frac{S_m \cdot t_m}{200 R_p^v} \int_{y_k}^{y_k + y_{осн}} y^v dy \quad (2.21.)$$

Във втория случай (фиг. 2.3), площта на фигура CFGE се определя по зависимостта:

$$A_{CFGE} = \frac{S_m \cdot t_m}{200 R_p^v} \int_{y_k}^{R_p} y^v dy + \frac{S_m}{200} \int_{R_p}^{y_k + y_{\text{осн}}} \left(100 - (100 - t_m) \cdot \left(\frac{R_{\text{max}} - y}{R_{\text{max}} - R_p} \right)^{v_B} \right) dy \quad (2.22.)$$

2.3. Определяне на степента на уякчаване на повърхностния слой при ППД

При обработването на детайли чрез ППД за определянето на степента на уякчаване е целесъобразно да се използва зависимостта на Мейер [78]:

$$P = m(Rs)^{n-2} d_o^n / (R)^{n-2} \quad , \quad (2.33.)$$

където

- $m(Rs)^{n-2}$ е константа на Мейер, независеща от диаметъра на ролката, определяща само свойствата на материала и имаща размерност напрежение, (MPa);
- n - коефициент, зависещ от пластичните свойства на материала;
- d_o - диаметър на отпечатъка;
- Rs - радиус на ролката при изпитванията;
- R - приведеният радиус на контакт, от който се определя степента на уякчаване.

Големините на константите m и n могат много лесно да се намерят с помощта на двукратно вкарване на сачмата в изпитвания материал при различно натоварване.

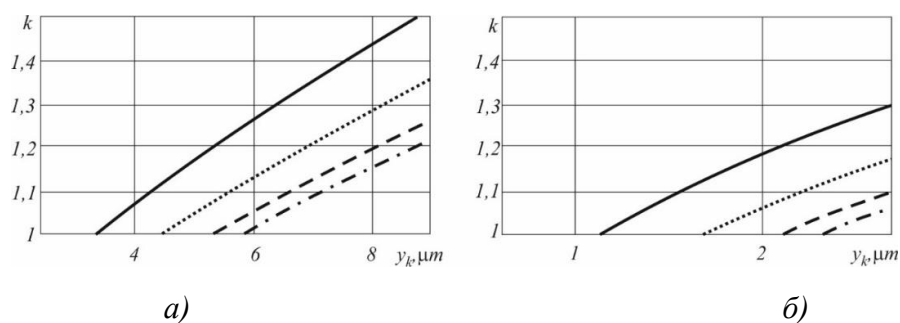
Тогава за зависимостта за коефициента на уякчаване съгласно т.1.3.2, получаваме:

$$k = \frac{m \cdot Rs^{n-2}}{k_p c' \sigma_T} \left(\frac{4}{\pi} \right)^{n/2} A_r \left(\frac{n-1}{2} \right) \left(\frac{1}{R} \right)^{n-2} \quad , \quad (2.34.)$$

където

- A_r е фактичската контактна площ;
- m и n - експериментални характеристики на материала, зависещи от якостта му и склонността му към якост;
- k_p - поправъчен коефициент, отчитащ промяната на условията на деформиране на грапавините в сравнение с навлизането на сачмата в гладката обработвана повърхнина.

На фиг. 2.4 са показани графични зависимости на степента на уякчаване k от контактната близост за повърхнини с различна грапавост и с различни радиуси на деформация елемент на инструмента.



Фиг.2.4. Зависимости на степента на уякчаване k от контактната близост при: а) $Rz17,5$; $Ra3,2$; $Sm 0,15$ и приведен радиус на деформираният елемент на инструмента $R_{np}=10, 8, 5$ и $2,5$ mm; б) $Rz 6,8$; $Ra1,25$; $Sm 0,15$ и приведен радиус на деформираният елемент на инструмента $R_{np}=10, 8, 5$ и $2,5$ mm

2.4. Пресмятане на работното усилие при довършваща и довършващо-уякчаваща обработка чрез ШПД

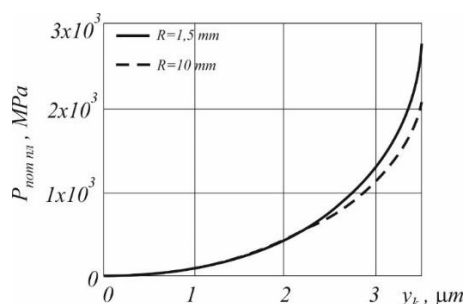
В границите на номиналните контактни площи, силата на обработка се формира в две зони:

- зона на еластично-пластична деформация, разположена в предната част на контакт (от линията на началото на контакт до максималното внедряване на инструмента);
- зона на еластично възстановяване, разположена след точките на максималното внедряване на инструмента до линията на отделяне на инструмента от обработваната повърхнина.

Доколкото физичната картина на контакт в тези зони се различава съществено, то пресмятането на усилията за тях е целесъобразно да става отделно, а резултантното работно усилие да се получава чрез сумиране на еластично-пластичната съставляваща $P_{пл}$ и съставляващата на еластичното възстановяване P_e :

$$P = P_{пл} + P_e \quad (2.45.)$$

Примерна графика на зависимост е показана на фиг. 2.5.



Фиг. 2.5. Зависимост на номиналното контактено налягане в зоната на еластично-пластичната деформация $P_{ном\ пл}$ при приведени радиуси на инструмента $R= 5, 10$ mm от големината на контактната деформация на грапавостта на обработваната повърхнина

Големината на деформациите във всяка точка на контакт на инструмента с обработваната повърхнина y_{ki} в границите на ширината на контактното петно b_k е определена от геометрични съображения по зависимостите:

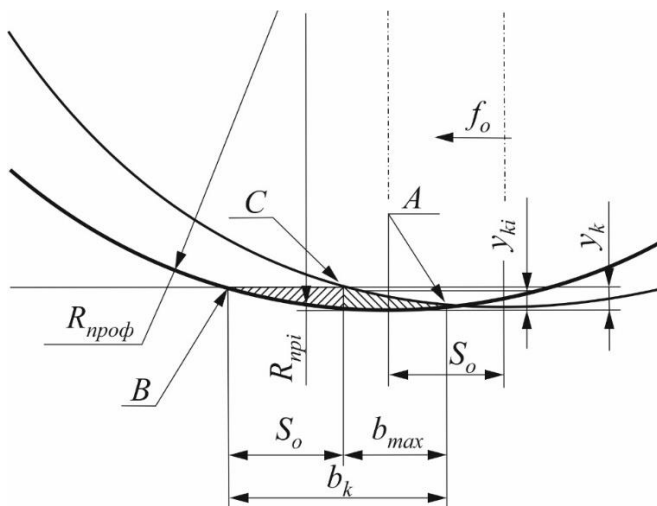
$$y_{ki} = y_{\text{проф пред } i} - y_{\text{проф } i} \quad (2.55.)$$

или

$$y_{ki} = y_k - y_{\text{проф } i}, \quad (2.56.)$$

където:

- $y_{\text{проф } i}$ е текущата координата на височината на профила на инструмента, отчетена от най-долната точка на профила.
- $y_{\text{проф пред } i}$ координатата y на следата на инструмента от предшестващия проход, определяща отместването на профила на инструмента на големина на надлъжното подаване f_0 .



Фиг. 2.6. Принципна схема за определяне на номиналната контактна площ: А- точка на пресичане на следата от обработка от предшестващия проход с профила на деформирания елемент на инструмента; В- точка на пресичане на профила на деформирания елемент на инструмента в текущото положение с необработваната повърхнина; С- точка, определяща границата от следата на предшестващия проход на инструмента; b_k - ширина на контакта; b_{max} - ширина на следата от предшестващия проход, попадаща в зоната на контакт

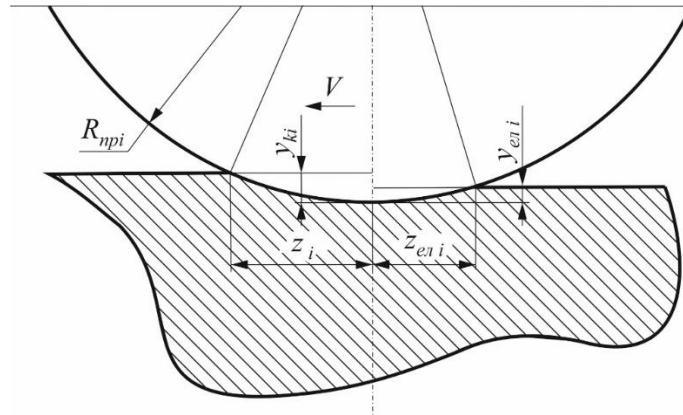
Изхождайки от големината на контактните деформации в дадена точка y_{ki} , приведенят радиус на инструмента в дадената точка $R_{пр i}$ се определя от координатата z_i определяща началният контакт на инструмента и работната повърхнина на заготовката (фиг.2.7) по зависимостта:

$$z_i = \sqrt{R_{пр i}^2 - (R_{пр i} - y_{ki})^2} \quad (2.57.)$$

Работният радиус на инструмента в дадената точка R_{npi} се определя по:

$$R_{npi} = R_{np} - y_{проф\ i} \quad , \quad (2.58.)$$

където R_{np} е приведенят работен радиус на инструмента.



Фиг. 2.7. Изходна схема за пресмятане на z_i и $z_{ел\ i}$

2.5. Изводи:

1. Формирана е физичната картина на процеса еластично-пластична деформация на височините на грапавините на изходните повърхнини обработвани чрез рязане и ППД.

2. Получени са теоретични зависимости, установяващи взаимовръзката на режимите на обработка и геометричните параметри на деформиращите части на инструмента с параметрите на изходната и получената грапавост за статични методи на обработване чрез ППД.

3. Установена е възможността за управление на носещата способност на грапавините на повърхнините (параметъра t_p) при обработване чрез рязане и ППД.

4. Развити са ограничителните критерии и са получени теоретични зависимости за пресмятане на максималния и минималния радиус на работните повърхнини на инструмента в зависимост от параметрите на изходните грапавини и вълнообразността на обработваната повърхнина.

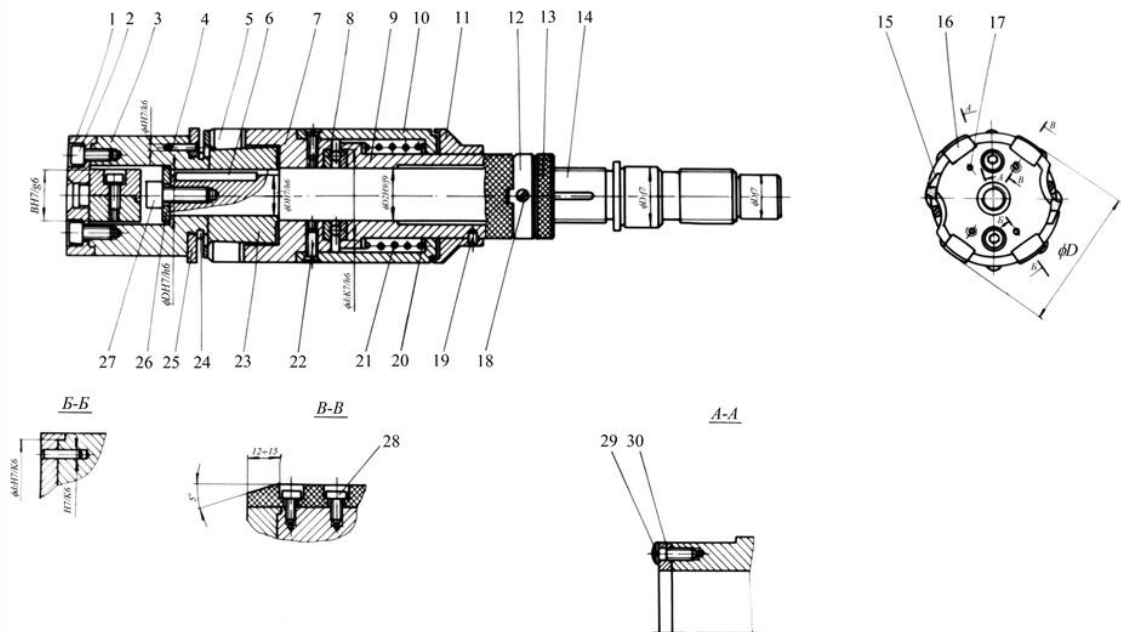
5. Теоретично е установено, че делът на еластичните деформации в формираните усилия на обработване е от 15 до 25%.

ГЛАВА ТРЕТА.

ЕКСПЕРИМЕНТАЛНИ ИЗСЛЕДВАНИЯ НА ГРАПАВОСТ ЧРЕЗ КОМБИНИРАНО ОБРАБОТВАНЕ НА ОТВОРИ ОТ ХИДРАВЛИЧНИ ЦИЛИНДРИ

3. Техническо обезпечаване на експеримента

На долните фигури е показана реализацията, инструментът, използван при обработка чрез метода комбинирано обработване на отвори от хидравлични цилиндри.



Фиг. 3.1. Комбиниран инструмент за обработване на отвор

3.1. Осигуряване работоспособността на устройството и инструментите в производствени условия.

За осигуряване на работоспособността на устройството и инструментите в производствени условия са уточнени и анализирани параметрите на процеса комбинирано обработване чрез рязане на ППД на отвори от хидравлични цилиндри.

Параметри на процеса комбинирано обработване на отвори

✓ *Технологични параметри*

Технологичните параметри на процеса са честота на въртене на инструменталното вретено $n_e = \omega_e/\pi, [min^{-1}]$ и подаване на инструмента $f, [mm/min]$

✓ *Геометрични параметри*

Геометричен параметър е номиналният диаметър D на обработвания отвор.

✓ **Енергосилови параметри**

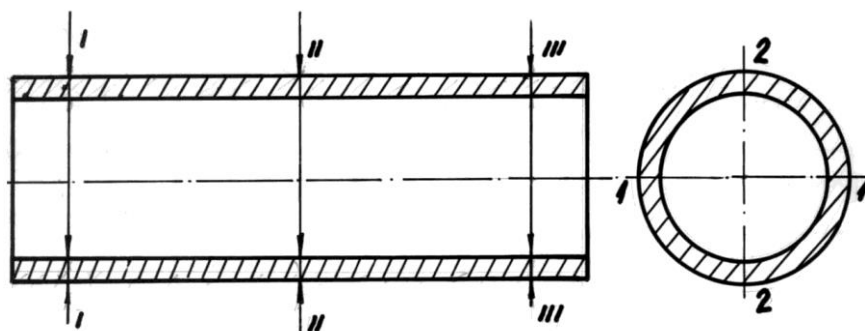
Енергосиловите параметри на процеса комбинирано обработване на отвори са: въртящият момент M_e , [N.m], приложен върху машинното вретено; осовата сила P , [N], приложена върху инструмента (заготовката); консумираната мощност N , [W].

✓ **Физични параметри**

Физичните параметри на процеса са: стегнатост i , [mm], дефинирана като разлика между диаметрите на инструмента и предварително пробития отвор; границата на провлачване σ_s на обработвания пластичен материал; ъгъл на нутация θ .

3.1.1. Експериментални образци

За изследване на грапавостта на обработвания детайл, изменението на вътрешния и външен диаметър получени след обработка чрез рязане и ППД, базираният и установен детайл се обработва с предварително настроен инструмент. След обработка на опитните образци провеждаме замервания в три сечения, равно отдалечени по дължина.



Фиг. 3.2. Схема за провеждане на контролните измервания

3.2. Експериментални изследвания на грапавост при комбинирана обработка чрез рязане и ППД

3.2.2. Планиране на експерименти експериментални резултати

Същност на планирането

Целта на планирането на изследвания процес е решаването на следните основни задачи [100]:

- ✓ Избор на целева функция.
- ✓ Избор на факторите, определящи характера на изследвания процес.
- ✓ Избор на вида и броя на функциите на входните фактори, които определят същинската структура на математическия модел

Избор на целева функция

Избират се следните целеви функции: Y_i $i = 1,2$:

- ✓ Получавана грапавост R_a
- ✓ Микротвърдост на повърхностния слой HV

Избор на фактори

Обект на изследване са следните фактори оказващи влияние върху грапавостта при процеса сферично дорноване:

- ✓ Стегнатост - $i, [mm]$
- ✓ Честота на въртене на машинното вретено - $n_e [min^{-1}]$
- ✓ Подаване на инструмента - $f [mm/min]$
- ✓ Начална грапавост - R_a^{init}
- ✓ Брой преходи - n
- ✓ Физико-механични свойства на материала
- ✓ Смазка между инструмента и заготовката

3.3. Планиране на експеримента за изследване на изходната височина на грапавините.

Направен е планиран експеримент. Височината на грапавините е измерена по две образуващи, като е взета средна аритметична стойност. Извършени са последователно многофакторен дисперсионен анализ с цел качествена оценка на влиянието на факторите и регресионен анализ с цел на получените експериментални резултати.

3.3.1. Фактори и нива на вариране

Планираният експеримент се извършва с 5 фактора. Нивата на вариране са изложени в таблица 3.1.

Таблица 3.1.

Управляващи фактори		Кодиране на нивата на факторите		
		-1	0	1
Натурални	Кодирани	Натурални		
Стегнатост - $i, [mm]$	x_1	0,10	0,22	0,32
Подаване - $f [mm/min]$	x_2	2000	2500	2800
Честота на въртене на машинното вретено - $n_e, [min^{-1}]$	x_3	800	1100	1400
Брой на преходите - $n, [бр]$	x_4	1	2	3
Начална грапавост - $R_a^{init}, [\mu m]$	x_5	1	3	5

3.3.7. Анализ на коефициента на редукция на грапавостта

С цел изследване на влиянието на отделните фактори в обработката на получените резултати се въвежда коефициент на редукция на грапавостта K_{red}^{Ra}

Коефициентът на редукция се определя чрез отношението между началната и получената след обработка грапавост.

$$K_{red}^{Ra} = \frac{R_a^{init}}{R_{a,u}} \quad (3.17.)$$

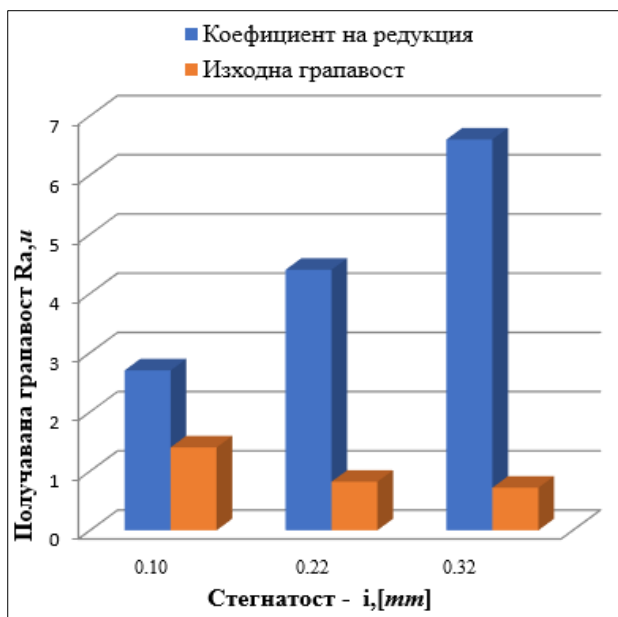
Резултатите за коефициента на редукция на грапавостта са показани в Таблица 3.7.

Извършено е и графично сравнение между коефициент на редукция K_{red}^{Ra} и изходна грапавост $R_{a,u}$ за всеки един от управляващите фактора. Стойностите в графиките са средностатистически.

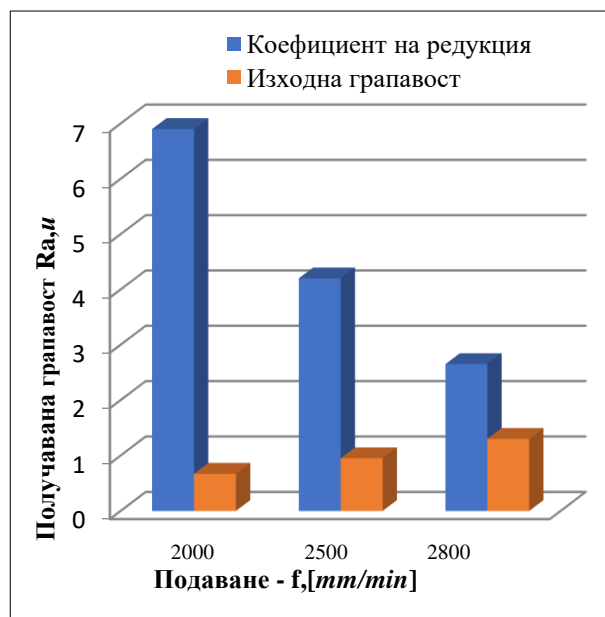
Таблица 3.7

<i>№</i>	<i>1</i>	<i>2</i>	<i>3</i>	<i>4</i>	<i>5</i>	<i>6</i>	<i>7</i>	<i>8</i>	<i>9</i>
$R_{a,измeрено}^{init} \mu m$	2,24	4,73	1,27	5,01	5,04	2,56	5,30	1,38	5,44
$\{R_{a,u}\}$	0,36	1,34	0,22	0,41	2,32	0,67	1,40	0,55	1,10
K_{red}^{Ra}	6,22	3,52	5,77	12,2	2,17	4,00	3,7	2,5	4,9
<i>№</i>	<i>10</i>	<i>11</i>	<i>12</i>	<i>13</i>	<i>14</i>	<i>15</i>	<i>16</i>	<i>17</i>	<i>18</i>
$R_{a,измeрено}^{init} \mu m$	2,22	5,17	1,21	1,18	5,14	1,42	5,04	3,01	2,94
$\{R_{a,u}\}$	0,49	1,01	0,57	0,53	1,12	0,62	1,48	0,81	1,68
K_{red}^{Ra}	4,53	5,1	2,1	2,2	4,58	2,3	3,4	3,7	1,8
<i>№</i>	<i>19</i>	<i>20</i>	<i>21</i>	<i>22</i>	<i>23</i>	<i>24</i>	<i>25</i>	<i>26</i>	<i>27</i>
$R_{a,измeрено}^{init} \mu m$	3,16	3,25	3,54	3,22	3,36	3,39	3,01	1,18	5,23
$\{R_{a,u}\}$	0,79	0,63	1,02	0,84	0,77	1,20	0,76	0,48	0,8
K_{red}^{Ra}	4,0	5,2	3,5	3,8	4,40	2,8	3,9	2,5	6,53

Експериментални резултати относно влиянието на стегнатостта и подаването върху получаваната грапавост са илюстрирани на фиг.3.6 и фиг.3.7.



Фиг. 3.6. Графика на K_{red}^{Ra} и $R_{a,u}$ спрямо стойности на фактор i



Фиг. 3.7. Графика на K_{red}^{Ra} и $R_{a,u}$ спрямо стойности на фактор f

Изводи:

- ✓ От получените експериментални резултати се вижда, че максимални стойности на k_{red}^{Ra} се получават при стегнатост 0,32 mm. Това ни дава основание да считаме, че стегнатостта е с голямо значение за процеса комбинирано обработване на отвори.
- ✓ Малките подавания водят до подобряване показателите на грапавостта. Оптимална грапавост се наблюдава при подаване $f = 10$ [mm/min].
- ✓ Скоростта на обработване се явява незначим фактор за получаваната грапавост на обработваните повърхнини.
- ✓ Началната грапавост R_a^{init} е фактор с определящо значение за получаваната грапавост. Това се обяснява чрез т.нар. технологична наследственост. Колкото по-висока е R_a^{init} , толкова по-нисък е k_{red}^{Ra} .
- ✓ Броят на преходите не оказва съществено влияние върху $R_{a,u}$.

ГЛАВА ЧЕТВЪРТА.

ИЗСЛЕДВАНЕ НА МИКРОТВЪРДОСТТА И УЯКЧАВАНЕ НА ПОВЪРХНОСТНИЯ СЛОЙ ПРИ КОМБИНИРАНО ОБРАБОТВАНЕ НА ОТВОРИ

4. Същност на измерването

4.1. Експериментални резултати

Постановка на експеримента

Измерването на микротвърдостта е извършено чрез използване на плана на експеримента от гл.3 – оптимален композиционен план с пет фактора.

На базата на получените резултати, е изчислен коефициент на уякчаване на микротвърдостта на повърхността K_y по формулата:

$$K_y = \frac{HV}{HV_{init}} \cdot 100\%, \quad (4.1.)$$

където

- HV_{init} е началната микротвърдост,
- HV е микротвърдостта след обработване.

Измервателен апарат Leica VMHT Auto е показана на фиг.4.1



Фиг.4.1. Leica VMHT Auto. Изглед отпред и отстрани.

Фактори на експеримента

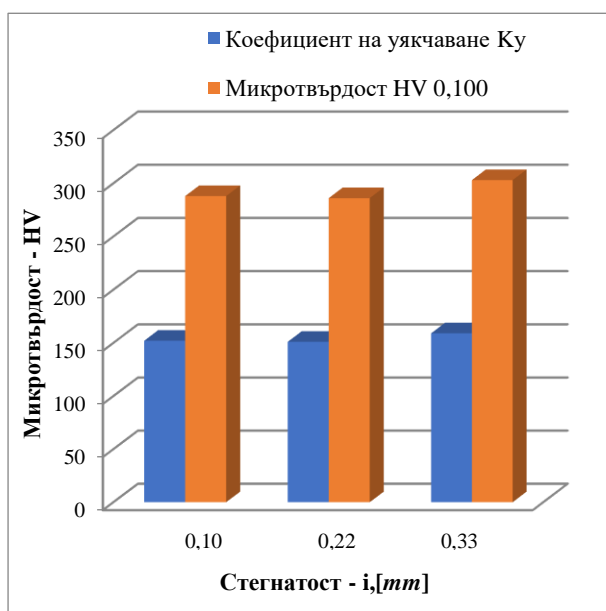
Планираният експеримент се извършва с 5 фактора. Нивата на вариране са изложени в таблица 4.2 .

Таблица 4.2

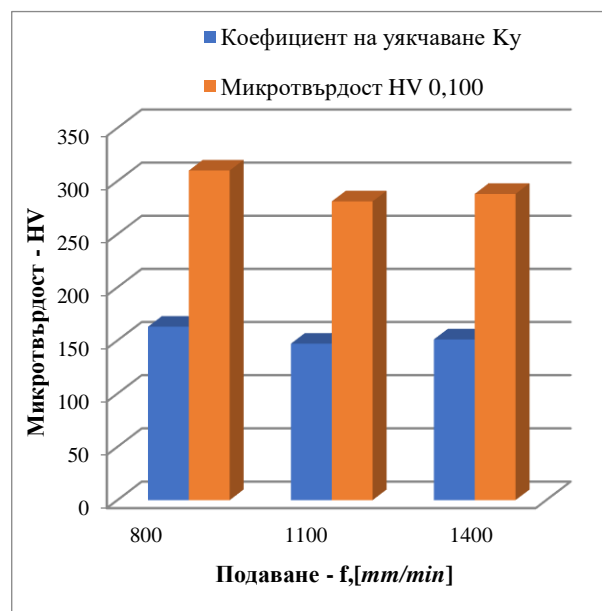
Управляващи фактори		Кодиране на нивата на факторите		
		-1	0	1
Натурални	Кодирани	Натурални		
Стегнатост - i , [mm]	x_1	0,10	0,22	0,32
Подаване - f [mm/min]	x_2	2000	2500	2800
Честота на въртене на машинното вретено - n_e , [min ⁻¹]	x_3	800	1100	1400
Брой на преходите - n , [бр]	x_4	1	2	3
Начална грапавост - R_a^{init} , [μm]	x_5	1	3	5

4.4. Графични зависимости на факторите на обработка спрямо коефициента на уякчаване

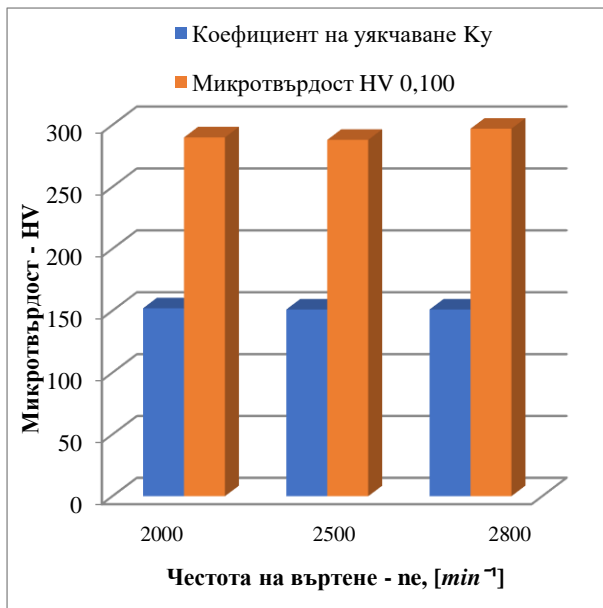
На базата на проведени дисперсионни анализи са графично изобразени средните стойности на изходната микротвърдост $\{HV_{0,100}\}$ и коефициента на уякчаване K_y .



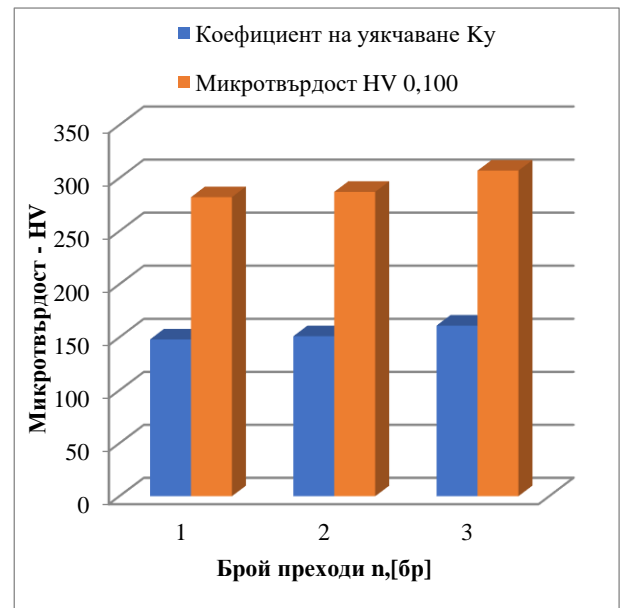
Фиг. 4.4. Влияние на стегнатостта върху микротвърдостта



Фиг. 4.5. Влияние на подаването върху микротвърдостта



Фиг.4.6. Влияние на честотата на въртене върху микротвърдостта



Фиг.4.7. Влияние на броя на преходите върху микротвърдостта

4.5. Регресионен анализ

Предвид факта, че планът е от втори ред (оптимален композиционен), регресионният модел е избран да бъде полином от втори ред, чиито коефициенти не трябва да бъдат повече от 27, за да може да се извърши коректен статистически анализ.

$$\begin{aligned}
 Y_{HV} = & 274,8 - 16x_1 + 121 - 4,7x_3 + 33x_4 - 3x_5 - 19,2x_1x_1 + & (4.5.) \\
 & 8,4x_2x_2 - 37x_3x_3 - 28x_4x_4 - 4,9x_5x_5 + 6,02x_1x_2 - 1,841x_2x_3 - \\
 & 4,023x_3x_4 - 12,274x_1x_3 + 16,313x_1x_4 - 9,322x_1x_5 - 0,624x_2x_4 - \\
 & 25,164x_1x_1x_2 + 9,274x_1x_1x_3 - 26,804x_1x_1x_4 + 1,044x_1x_1x_5 + \\
 & 29,015x_1x_2x_2 + 4,017x_1x_2x_3 + 5,966x_1x_2x_4 - 1,577x_1x_2x_5 + \\
 & 92,220x_1x_1x_2x_2
 \end{aligned}$$

4.7. Анализ на регресионния модел на Микротвърдостта HV

Обект на анализ е моделът (4.5). Зависимостта между кодирани (единични) x_ℓ и натурални фактори \tilde{x}_ℓ е:

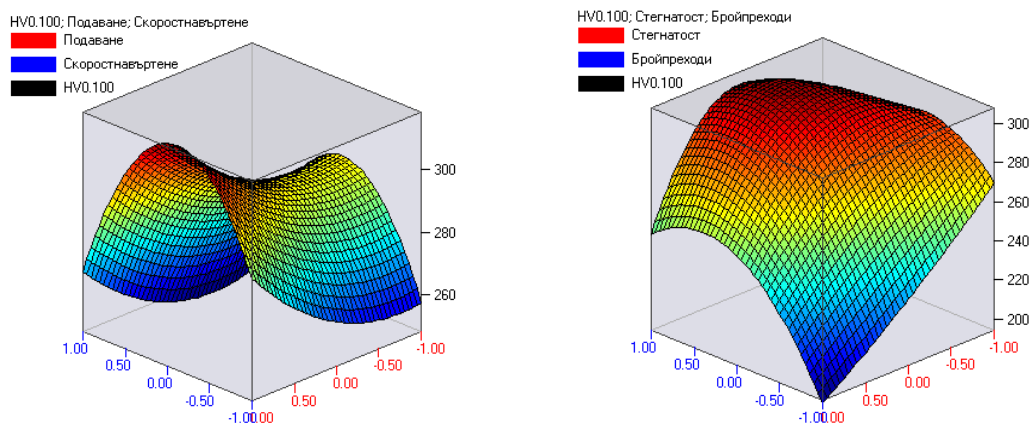
$$x_\ell = (\tilde{x}_\ell - \tilde{x}_{0,\ell})/\lambda_\ell \quad (4.17.)$$

$$\lambda_\ell = (\tilde{x}_{i,\ell} - \tilde{x}_{d,\ell})/2 \quad (4.18.)$$

където:

- $\tilde{x}_{0,\ell}$, $\tilde{x}_{\ell,\ell}$ и $\tilde{x}_{\partial,\ell}$ са съответно средно, горно и долно нива на ℓ – тия натурален фактор.

След заместване на (4.18) и (4.19) в (4.5), се получава изразът за микротвърдостта с натурални фактори. Анализът е извършен с QStatLab в два аспекта: чрез сечения на хиперповърхнината на моделираната микротвърдост посредством хиперравнини и чрез сканиране на получения линеен регресионен модел.



фиг. 4.9 Графична визуализация на модела на микротвърдостта

Изводи:

- ✓ По-високите стойности на стегнатостта водят до по-високи стойности на микротвърдостта.
- ✓ Оптимални стойности на микротвърдостта и коефициента на уякчаване се достигат при подаване $f = 2000[mm/min]$
- ✓ Честотата на въртене на заготовката оказва минимално влияние върху микротвърдостта. Най-високи стойности се наблюдават при $n_e = 800[min^{-1}]$
- ✓ При висок брой преходи, микротвърдостта намалява. Това се обяснява от процеса пренаклепване на материала.
- ✓ Ниската грапавост допринася за висока микротвърдост и висок коефициент на уякчаване.

ГЛАВА ПЕТА. ОПТИМИЗАЦИЯ НА ПРОЦЕСА КОМБИНИРАНО ОБРАБОТВАНЕ ЧРЕЗ РЯЗАНЕ И ППД НА ОТВОРИ ОТ ХИДРО- И ПНЕВМОЦИЛИНДРИ

5.1. Видове оптимизационни задачи и цел на изследването

5.3. Минимална грапавост и максимална повърхностна микротвърдост при 5 управляващи фактора.

Целевите функции са получаваната грапавост Y_{Ra} , дефинирана от полинома (3.1), и получаваната повърхностна микротвърдост Y_{HV} , дефинирана от полинома (4.3). Управляващите параметри са стегнатост i , подаване f , Честота на въртене на машинното вретено n_e , брой на преходите n и начална грапавост R_a^{init} .

$$\{X\}^T = [i, f, n_e, n, R_a^{init}]$$

Параметричните ограничения са:

$$0.15 \leq i \leq 0.3; 2000 \leq f \leq 2800; 800 \leq n_e \leq 1400; 1 \leq n \leq 3; 1 \leq R_a^{init} \leq 5$$

Не са необходими ограничителни функции.

5.4. Многокритерийна оптимизация с три управляващи фактора

Параметричните ограничения са:

$$0.15 \leq i \leq 0.3; 2000 \leq f \leq 2800; 1 \leq R_a^{init} \leq 5$$

ОБЩИ ИЗВОДИ ОТ ДИСЕРТАЦИОННИЯ ТРУД

1. Формирана е физичната картина на процеса еластично-пластична деформация на височините на грапавините на изходните повърхнини, обработвани чрез комбинирано обработване на отвори чрез рязане и ППД.
2. Получени са теоретични зависимости, установяващи взаимовръзката на режимите на обработка и геометричните параметри на деформиращите части на инструмента с параметрите на изходната и получената грапавост за статични методи на обработване чрез ППД.
3. Развити са ограничителните критерии и са получени теоретични зависимости за пресмятане на максималния и минималния радиус на работните повърхнини на инструмента в зависимост от параметрите на изходните грапавини и вълнообразността на обработваната повърхнина.
4. Установено е влиянието на основните фактори на процеса на комбинирано обработване чрез рязане и ППД (стегнатост, подаване, честота на въртене на машинното вретено, начална грапавост R_a^{init}) върху качеството на обработвани вътрешни цилиндрични повърхнини.
5. С намаляване на подаването се наблюдава подобряване показателите на грапавостта. Скоростта на обработване се явява незначим фактор за получаваната грапавост на обработваните повърхнини. Началната грапавост е фактор с определящо значение за формиране на микрогеометрията на обработваните отвори.
6. Резултатите от направените изследвания показват, че по – високите стойности на стегнатостта водят до по – високи стойности на микротвърдостта.
7. По – ниските подавания способстват получаването на по – високи стойности на микротвърдостта.
8. Честотата на въртене на заготовката оказва минимално влияние върху микротвърдостта.
9. При висок брой преходи, микротвърдостта намаля. Това се обяснява от процес пренаклеп.
10. Ниската грапавост допринася за висока микротвърдост и висок коефициент на уякчаване.

СПРАВКА ЗА ПРИНОСИТЕ В ДИСЕРТАЦИОННИЯ ТРУД

I. Научно - приложни приноси

1. Получени са теоретични зависимости на взаимовръзката на режимите на обработка и геометричните елементи на инструмента с параметрите на изходната и получаваната грапавост;
2. Изведени са теоретични зависимости за пресмятане на минималния и максималния радиус на деформиращите цилиндрични инструменти;
3. Проведен е регресионен анализ и са получени триизмерни модели, способстващи определянето на оптимални технологични параметри на режимите на обработка при конкретни производствени условия;
4. Предложена е методика за оценка микротвърдостта на уякчения слой материал след рязане и ППД на вътрешни ротационни повърхнини. На база на петфакторен планиран експеримент са генерирани графични зависимости за влиянието на режимите на обработка върху микротвърдостта.

II. Приложни приноси

1. Направената многокритериална оптимизация на режимите на обработка при рязане и ППД на отвори от хидравлични и пневматични цилиндри и са получени аналитични модели за определяне на оптимална микротвърдост и грапавост;
2. Установени са допустимите нива на стегнатостта, подаването и силата на деформиране, осигуряващи оптимално качество на обработените повърхнини.

Списък на отпечатани и приети за печат публикации към научния труд

1. Статии под печат

1. Караджа, Г., Ленгеров, А. – Определяне на осовата сила на инструмента при ППД на повърхнини на отвори от хидро – и пневмоцилиндри, „Машиностроене и машинознание“, Година XX, Книга 1, 2025
2. Караджа, Г., Ленгеров, А. - Аналитично определяне на точността на режещата част на инструментите за комбинирано обработване на отвори от хидро – и пневмоцилиндри, „Машиностроене и машинознание“, Година XX, Книга 1, 2025
3. Ленгеров, А., Караджа, Г. - Разработване на система за управление на процеса комбинирано обработване на отвори от пневно – хидравлични цилиндри, Младежки форум „Наука, технологии, иновации, бизнес“ 2024, есен, Сборник доклади
4. Левичаров, Г., Караджа, Г., Ленгеров, А. – Експериментално изследване на грапавостта при ППД на външни цилиндрични повърхнини, Младежки форум „Наука, технологии, иновации, бизнес“ 2024, есен, Сборник доклади

2. Статии приети за отпечатване

1. Караджа, Г., Ленгеров, А. – Повишаване на точността на отвори обработване с едноопорни и двуопорни разстъргващи борщанги, Младежки форум „Наука, технологии, иновации, бизнес“ 2025, есен, Сборник доклади
2. Ленгеров А, Караджа Г., Хаджистойков Д., Аналитично определяне на силата на деформиране при комбинирано обработване на отвори, „Машиностроене и машинознание“, Година 26, Книга 1, 2026

ANNOTATION

The dissertation presents a theoretical and experimental study of the combined hole machining process in order to optimize solutions for combining boring and burnishing processes, ensuring high productivity and surface quality.

In this direction, it is necessary to direct efforts to develop new designs of progressive combined tools, ensuring single-pass machining.

The influence of machining modes in combined hole machining on the quality indicators of the surfaces has been studied.

From the derived analytical and graphical models, the optimal technological parameters of the combined hole machining process of hydro- and pneumatic cylinders may be determined.

A methodology is proposed for assessing the microhardness of the reinforced layer of material after machining and burnishing of internal rotational surfaces. Based on a five-factor planned experiment, graphical dependencies for the influence of machining modes on microhardness have been generated.

The permissible levels of tightness, feed and deformation force have been established, ensuring optimal quality of the processed surfaces.