

**КАЧЕСТВО НА ПОВЪРХНИНТЕ И АНАЛИЗ НА УСЛОВИЯТА ПРИ  
ДОВЪРШВАЩО ОБРАБОТВАНЕ С ДИАМАНТНО ЗАГЛАЖДАНЕ****QUALITY OF SURFACE AND ANALYSIS OF CONDITIONS IN  
FINISH MACHINING WITH DIAMOND SMOOTHING****Велизар Кузманов\***  
ТУ-Габрово

Статията е постъпила на 10 септември 2014г.; приета за отпечатване на 14 ноември 2014г.

**Abstract:**

Finish machining with diamond burnishing is used to improve the performance properties of machine parts. Compared with other types of plastic deformation, diamond burnishing has significant advantages, arising from the physic-mechanical properties of diamond and the conditions under which it takes place. In the work the conditions and factors that affect the quality of the processed diamond smoothing surfaces are analyzed.

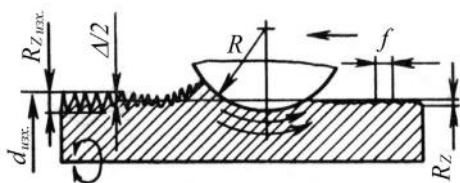
**Key words:** finishing, diamond burnishing, quality, diamond burnishing tools.

**1. ВЪВЕДЕНИЕ**

За качеството на получените повърхнини след обработване може да се съди по условията на обработване и по строежа и структурата на повърхностния слой, които се характеризират с комплекс от характеристики.

Качеството на обработваните повърхнини чрез диамантно заглаждане се определя от геометрични характеристики и физико-механични параметри. Към първите се отнасят вълнообразността, макро- и микрогеометрията, а към вторите – твърдостта на повърхнината, интензивността и дълбочината на уякчения слой, остатъчните напрежения в повърхностните слоеве и др.

Грапавостта на повърхнината е качествен показател, представляващ съвкупност от неравности с относително малки стъпки и е прието тя да се определя по профила, който се образува в сечение на тази повърхнина с равнина, перпендикулярна на номиналната (лицевата) повърхнина на определена базова дължина (фиг. 1).



Фиг. 1. Схема на процеса „диамантно заглаждане“ с изходната и крайната грапавост на обработваната повърхнина ( $d_{изх.}$  – изходен диаметър на детайла 1;  $\Delta/2$  – изменение на размера на детайла след заглаждането;  $Rz_{изх.}$  и  $Rz$  – изходната и крайната грапавост на обработваната повърхнина;  $f$  – подаване на оборот;  $R$  – радиус на диамантния кристал 2)

Твърдостта е двойствен качествен показател - на основния материал (сърцевината) и на повърхностния слой. От гледна точка на експлоатацията на машиностроителните детайли по-голям интерес представлява твърдостта на повърхностния слой, която е обикновено по-голяма от твърдостта на сърцевината. Повърхностният слой се уякчава при довършващите и предшестващите ги операции (съществува технологическа наследственост).

При довършващото обработване с диамантно заглаждане на детайлите в резултат на взаимодействието на инструмента с обработваната повърхнина, кристалните зърна се изкривяват и разпъват по посока на деформацията (фиг. 1) (образува се текстура, изкривява се повърхнината на приплъзване и се появяват дефекти на кристалната структура), което увеличава твърдостта на повърхностния слой (увеличава се якостта на опън, намалява се еластичността на повърхностния слой, изменят се магнитните и някои други свойства на метала). Върху качеството на повърхнината оказват влияние физико-механичните свойства на изходния материал (заготовката), методите, режимите и условията на довършващото обработване [2,3,7,8].

Основната цел на статията е да се анализират тези условия с цел създаване на възможности за решаване на оптимизационни инженерни задачи.

**2. ИЗЛОЖЕНИЕ**

Всеки технологически метод за обработване, в т.ч. и за довършващо обработване, се характеризира с определена точност и грапавост (табл. 1), като определено влияние върху тях оказват режимите на обработване. Максимална височина на микрограпавините се получава при скорост на обработване  $v = 15 \div 25 \text{ m/min}$ , което се обяснява с образуването на наслойка в този

диапазон на скоростта. *Подаването*  $f$  (mm/tr) влияе различно на грапавостта на обработваните повърхнини при различните методи (с увеличаване на подаването грапавостта расте). *Дълбочината на обработване* при достатъчна стабилност на технологичната система почти не оказва влияние върху грапавостта на обработваната повърхнина.

Формата на обработващата част на инструмента (накрайника с диамантния кристал – индентора) влияе на грапавостта (фиг. 1) (неравностите, които се образуват по обработваната повърхнина не могат да бъдат обяснени само от неговото движение), като фактичестката грапавост, особено при чистово и довършващо обработване, е по-голяма от изчислената.

Височината на грапавините след диамантно заглаждане могат да се определят с емпиричната формула

$$Ra = \frac{C \cdot f^x \cdot v^y}{p^z} Ra_{изх}^u, \quad (1)$$

където  $p$  – брой на проходите;  $Ra_{изх}$  – изходната грапавост;  $C, x, y, z, u$  – емпирични коефициенти.

Табл. 1. Грапавост и точност на обработваните повърхнини след различни довършващи методи за обработване

Методи за довършващо обработване	Грапавост $R_a$ , $\mu\text{m}$	Квалитет на точност
1	2	3
<b>Стомана</b>		
Фино фрезозване		
цилиндрично	1,25 - 0,63	8 - 9
челно	1,25 - 0,32	6 - 7
Фино стъргане	1,25 - 0,32	8 - 9
Фино обстъргване	0,63 - 0,32	6 - 7
Фино разстъргване	1,25 - 0,32	6 - 7
Фино райбероване	0,63 - 0,16	6 - 7
Протегляне	0,32 - 0,08	6 - 7
Фино шлифозване:		
цилиндрично	0,08 - 0,02	6 - 7
челно	0,32 - 0,08	7
Електроабразивно шлифозване	0,32 - 0,02	5 - 7
Електрохимично полиране	0,32 - 0,01	6 - 8
Анодно-механично	0,63 - 0,02	6 - 7
Магнитно-абразивно	0,32 - 0,04	–
Калиброване със сфери след разстъргване	1,25 - 0,16	–
Калиброване със сфери след райбероване	1,25 - 0,02	–
Чисто притриване	0,63 - 0,08	6 - 7
Фино притриване	0,08 - 0,01	5
Обикновено полиране	0,63 - 0,08	6 - 7
Фино полиране	0,08 - 0,01	5
Механично притриване	0,63 - 0,08	7
Обикновено хонинговане	0,63 - 0,32	7
Фино хонинговане	0,32 - 0,02	6
Еднократен суперфиниш	0,32 - 0,08	6 - 7
Финен суперфиниш	0,16 - 0,04	5
Двукратен суперфиниш	0,04 - 0,01	4 - 5

<b>Чугун, месинг, бронз</b>		
Фино челно фрезозване	1,25 - 0,32	6 - 7
Фино стъргане	1,25 - 0,32	8 - 9
Фино обстъргване	0,63 - 0,16	6 - 7
Фино разстъргване	1,25 - 0,32	6 - 7
1	2	3
Фино райбероване	0,32 - 0,16	6 - 7
Електроабразивно шлифозване	0,63 - 0,08	5 - 7
Електрохимично полиране	0,32 - 0,04	6 - 8
Анодно-механично	1,25 - 0,16	6 - 7
Магнитно-абразивно	0,32 - 0,08	–
Полиране	1,25 - 0,08	6 - 7
Механично притриване	0,63 - 0,08	7
Хонинговане:		
Обикновено хонинговане	0,63 - 0,16	7
Фино хонинговане	0,16 - 0,04	6
<b>Леки сплави</b>		
Фино челно фрезозване	1,25 - 0,63	6 - 7
Фино стъргане	1,25 - 0,32	8 - 9
Фино обстъргване	0,63 - 0,32	6 - 7
Фино разстъргване	1,25 - 0,32	6 - 7
Фино райбероване	0,63 - 0,32	6 - 7
Електроабразивно шлифозване	1,25 - 0,16	5 - 7
Електрохимично полиране	0,32 - 0,02	6 - 8
Анодно-механично	1,25 - 0,08	6 - 7
Магнитно-абразивно	0,63 - 0,16	
Механично притриване	0,63 - 0,16	7
Обикновено хонинговане	0,63 - 0,16	7
Фино хонинговане	0,16 - 0,04	6

Подходящият избор на мазилно-охлаждаща течност (МОТ) може да намали грапавостта и подобри трайността на инструмента (напр. при обработване с използването на МОТ височината на грапавините се намалява 20 ÷ 40% в сравнение с тази при обработване без МОТ [4,6]).

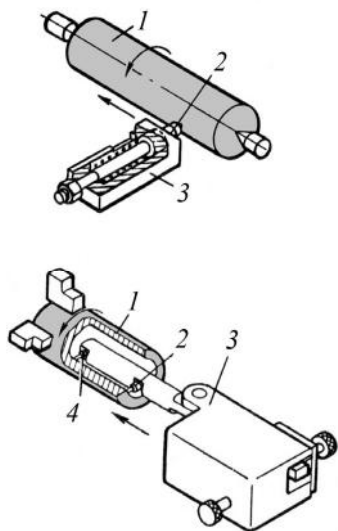
Заглаждането с диаманти и други свръхтвърди материали намира приложение за подобряване на експлоатационните свойства на детайлите. То се осъществява чрез плъзгане по повърхността на детайла на инструмент с крайник, имащ работна част във вид на изпъкнала криволинейна повърхнина. В резултат на заглаждането се намалява грапавостта и се повишава твърдостта на повърхностния слой на обработваните детайли. В сравнение с други видове пластично деформиране диамантното заглаждане притежава съществени преимущества, дължащи се на физико-механичните свойства на диамантния кристал.

Диамантните крайници могат да се използват за заглаждане на детайли от пластични материали и сплави с произволна твърдост. Незначителните усилия прилагани към тях позволява обработването и на нестабилни детайли. Към преимуществата на процеса се отнасят възможността за използване на прости по форма инструменти и универсални машини. Диамантното заглаждане се използва вместо трудоемките абразивни довършващи обработки. То е високо ефективно при обработването на високоякостни и закалени стомани 38Cr4, 100Cr6, HS6-5-2, 12CrNi12-4, 18CrMnT4, 38CrMo5, X7CrNi16-6, 12CrNiV8-4, конструкционни

стомани С15, С20, С30, Х40Cr13, Х12CrNiTi18-9, Х10CrNiTi18-2 (както в нормално така и в състояние след термична обработка), цветни сплави, бронз, сив чугун и др. [1].

При обработване на незакалени стомани, цветни метали и сплави, изходна грапавост се определя от условието  $Ra_{изх} < 2.5 \mu\text{m}$ . Закалени стомани е целесъобразно да се обработват довършващо с диамантно заглаждане при  $Ra_{изх} = 0,23 \dots 0,63 \mu\text{m}$ .

Обработени детайли с абразивни инструменти преди довършващо обработване с диамантно заглаждане намаляват трайността на диамантния накрайник (препоръчва се измиване на такива детайли преди диамантното заглаждане).



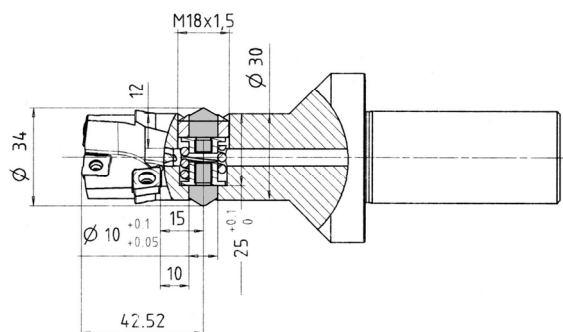
Фиг. 2. Схеми на диамантно заглаждане (а – на външна цилиндрична повърхнина, б – на вътрешна с комбиниран инструмент за разстъргване и диамантно заглаждане)  
1 – обработван детайл,  
2 – диамантен накрайник, 3 – инструмент за диамантно заглаждане, 4 – режещ накрайник

Ротационни детайли могат да се обработват чрез диамантно заглаждане на стругови, пробивни и специални диамантно-заглаждащи машини по схемите, показани на фиг. 2. Обработването с твърдо закрепени инструменти е добре да става на машини с повишена точност и стабилност, като дълбочината на заглаждането е в границите на  $a = (1,1-1,3)Rz$ . В резултат на заглаждането се подобрява геометричната форма на повърхнината. Вследствие на пластичните деформации, предизвикващи изменение във формата, повърхнините които се получават са нееднородни по грапавост и твърдост. За намаляването на тази нееднородност на уячения слой, диамантното заглаждане е целесъобразно да става при едно установяване на детайла с режещи преходи предшествващи заглаждащия т.е. обработване с комбиниран режещо-заглаждащ инструмент [10] (фиг. 2. и фиг. 3).

При обработване с еластично закрепен инструмент не се задава дълбочината на заглаждане, а радиалното усилие, с което инструмента трябва да се притисне към обработваната повърхнина. За целта се използват специални еластични държачи [4,6] които осигуряват постоянно радиално усилие, даже при необходимост от радиални премествания на инструмента.

Радиалното усилие в държач с еластично закрепен инструмент се създава от тарирана пружина или еластичен участък от тялото на държача.

При инструменти с еластични държачи за диамантно заглаждане на вътрешни повърхнини радиалното усилие се задава с помощта на тарирана пружина на опън или натиск.



Фиг. 3. Комбиниран режещо-заглаждащ инструмент [10]

Инструментът за диамантно заглаждане (ИДЗ) в най-общия случай представлява държач със закрепен към него накрайник с кристал на диаманта. Работната повърхност на диаманта се използва във вид на цилиндър, сфера, конус (табл. 2) [4,6] или кръгов тороид [4], за което се използват диамантни кристали с форма на ромбичен додекаедър или октаедър.

Инденторите със сферична работна повърхност се използват за заглаждане на външни, вътрешни и челни повърхнини, с тороидална повърхност – за заглаждане на външни, вътрешни и челни повърхнини, с цилиндрична – за заглаждане само на външни повърхнини (в процеса на заглаждане образуващата на цилиндричния участък на диамантния кристал се установява под ъгъл 45-90° към образуващата на обработвания цилиндър). В процеса на заглаждане инденторите с тороидална работна повърхнина образуват петно на контакт във вид на елипса, като инструментът се установява спрямо детайла така, че голямата ос на елипсоидното контактно петно се разполага в направление на главното движение (при обработване на закалени и високоякостни стомани) или в направление на подаването при обработване на меки и цветни метали [4].

За изработването на диамантни накрайници се използват най-често синтетични диаманти (баласт и карбонат), а също и синтетичен корунд (рубин и сапфир), минералокерамика и твърди сплави. Индентори от първите се използват за заглаждане на прекъснати повърхнини на стоманени детайли, като интензивността

на износването на диаманта зависи от формата и размерите на работната повърхнина и режимите на обработване. При температури от  $700 \div 750^{\circ}\text{C}$  работният участък на диаманта се разрушава (основен критерий за затъпяването му се явява грапавостта на обработваната повърхнина). Трайността му е в границите на  $50 \div 650 \text{ km}$ , т.е. от 8 до 40 часа машинно време. За повиша-

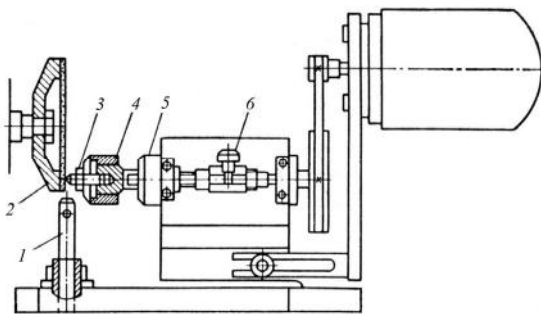
ване трайността на накрайника, държача периодично се завърта около оста си и се използва МОТ.

Използваните радиуси на закръгление на работните повърхнини на индентора в зависимост от твърдостта на обработвания материал за дадени в табл. 3 [6].

Заточването и довършващото обработване на диамантния инструмент става на универсални заточни машини с помощта на специални приспособления фиг. 4 [6].

Табл. 2. Основни параметри на различни диамантни накрайници

Работна повърхнина	Конструкция (1 – диамант, 2 – накрайник)	R	h	D	d	L	l	$\chi_r, ^{\circ}$	Маса (карат)	Типови конструкции (Тип I – цилиндрична, Тип II – цилиндрична с глава)			
		mm											
Цилиндрична		0,5	3,0	10	6	20	12	30	0,41 – 0,60				
		1,0	4,0						0,75 – 0,78				
		1,5	4,5						0,78 – 0,83				
		2,0	5,0						0,86 – 0,95				
		2,5	3,0						0,21 – 0,30				
Сферична		0,5	-	10	6	20	12	30	0,21 – 0,30				
		1,0	-						0,31 – 0,40				
		1,5	-						0,41 – 0,60				
		2,0	-						0,61 – 0,85				
		2,5	-						0,21 – 0,30				
		3,0	-	12	8	32	20	30	0,31 – 0,40				
		3,5	-						0,41 – 0,60				
		4,0	-						0,21 – 0,30				
		0,5	-						8	20	-	30	0,31 – 0,40
		1,0	-										0,41 – 0,60
1,5	-	0,21 – 0,30											
2,0	-	0,31 – 0,40											
2,5	-	0,41 – 0,60											
Конусна		-	-	10	6	20	12	45	-				



Фиг. 4. Приспособление за възстановяване на индентори (1 – шаблон, 2 – диамантен диск, 3 – индентор, 4 – гайка, 5 – гилза, 6 – винт)

Към режимите за диамантно заглаждане се отнася и радиалната сила  $F_p$  (оптималната стойност -  $50 \div 300 \text{ N}$  е тази, при която напълно се премахват микронеравностите и се уякчава повърхностния слой). По-голямата радиална сила води до пренаклепване и влошаване на качеството на обработваната повърхнина. При обработване на закалени и нисковъглеродни стомани оптималната радиална сила се определя с израза

$$F_p = 0,13HV \left( \frac{d \cdot R}{d + R} \right)^2, \tag{2}$$

където: HV – твърдост по Викерс, МПа; d – диаметър на обработваната повърхнина, mm; R – радиус на работната част на инструмента, mm.

Оптималната стойност на подаването  $f$  при диамантно заглаждане е в диапазона от  $0,01 \div 0,10 \text{ mm/tr}$  (колкото по-малко е подаването, толкова по-високо е качеството на обработваната повърхнина). Диамантното заглаждане обикновено се извършва на един проход, като периферната скорост на заглаждане  $v$  незначително влияние на качеството на повърхностния слой и е в диапазона от  $10 \div 300 \text{ m/min}$ . При скоростно заглаждане ( $v = 300 \div 350 \text{ m/min}$ ), качеството на заглаждания повърхностен слой се влошава, появяват се оцветявания,

Табл. 3

Обработван материал	Радиус на индентора, mm
Закалени стомани с твърдост:	
60...65 HRC	1,0 - 1,5
35...60 HRC	1,5 - 2,5
Конструкционни стомани	2,0 - 3,5
Цветни метали и сплави	3,0 - 4,0

показващи, че в него протичат структурни трансформации (появяват се остатъчни опънови напрежения) и трайността на инструмента рязко намалява.

Най-често срещаните режими на диамантно заглаждане са дадени в табл. 4. [4, 6, 9] При заглаждане на стомани в качеството на MOT се използва индустриално масло, а при заглаждането на цветни метали и сплави - керосин.

Табл. 4. Режими за диамантно заглаждане

Обработван материал	Твърдост на материала	$F_p, N$	$f, \text{mm/tr}$	$V_B, \text{m/min}$	$Ra, \mu\text{m}$	
					изходна	достигната
<b>Стomана:</b>						
15Cr4	58...64 HRC	170	0,05	90	0,32	0,08
C20	-	125	0,05	80 - 150	2,50	0,32
	50 HRC	150	0,07	140	1,25	0,32
38Cr4	36...58 HRC	100	0,05	100	1,25	0,32
C30	170 HB	135	0,05	30 - 90	2,50	0,32
C45	190 HB	140	0,02	25 - 185	1,25	0,08
	36 HRC	125	0,05	80 - 150	1,25	0,16
	45 HRC	130	0,01	25 - 185	0,32	0,08
	60 HRC	140	0,02	25 - 185	1,25	0,16
100Cr6	60...62 HRC	150	0,04	100 - 120	1,25	0,32
HS6-5-2	60...64 HRC	140	0,04	-	0,63	0,16
X12CrNiTi18-9	200 HB	130	0,02	-	1,25	0,32
12NiCr12-5	60 HRC	150	0,04	-	0,63	0,16
18CrMnTi4	62 HRC	150	0,04	-	0,63	0,16
38CrMoAl5	210 HB	135	0,05	30 - 90	1,25	0,16
	64...66 HRC	200	0,02	94	0,16	0,04
<b>Чугун</b>						
GJL-200	-	150	0,07	100	1,25	0,32
<b>Сплав:</b>						
FeNi32	-	150	0,07	40	0,63	0,08
AlCu4Mg1Mn1SiFe	-	80	0,05	50	0,63	0,08
AlCu4MgMn	-	80	0,03	100	0,63	0,04
CuZn40Pb1	168 HB	100	0,05	-	2,50	0,32
<b>Бронз</b>						
CuAl9Fe4	238 HB	110	0,05	-	2,50	0,32

### 3. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

- При заглаждане с еластично закрепен инструмент точността на формата на обработваните детайли не се изменя (размера на детайла може да се промени в границите от 1 ÷ 15  $\mu\text{m}$ , и затова предшестващият проход е препоръчително да осигури точност на обработваните размери с 20 ÷ 30% по-висока от зададената).

- При заглаждане с твърдо закрепен инструмент, точността на геометричната форма на обработваните детайли се увеличава незначително (некръгlostта и праволинейността намаляват с 50%, а овалността и конусността с 15 ÷ 25%).

- Грапавостта на загладените повърхнини зависи от метода на закрепване на инструмента, радиуса на работната му повърхност, радиалната сила, подаването,

боя на проходите, скоростта на обработване, изходната грапавост, пластичните свойства на обработвания материал, като загладената повърхнина се характеризира с кръгла форма на микронеравностите и с характерен огледален блясък.

- При правилно подбрани режими грапавостта може да бъде намалена няколко пъти (от 1,25-2,5 до 0,04-0,16), изходната микротвърдост може да се увеличи в диапазона от 5 ÷ 60%, като дълбочината на наклепвания слой достига до 400  $\mu\text{m}$  и в обработените повърхнини възникват значителни остатъчни напрежения на натиск.

Имайки предвид, че обработените детайли притежават висока устойчивост на износване при триене чрез плъзгане, висока контактна якост и якост на умора [5], то направените заключения дават възможност да се оптимизират и условията на довършващото обработване чрез диамантно заглаждане за обработване на болтови отвори в наставови възли за транспортното машиностроене.

### ЛИТЕРАТУРА

- [1] Абразивная и алмазная обработка материалов: Справочник /А. Н. Резников, Е. И. Алексенцев, Я. И. Барац и др./Под ред. А. Н. Резникова. - М.: Машиностроение, 1977. - 391 с.
- [2] Основы технологии машиностроения/Под ред. В. С. Корсакова. - 3-е изд., доп. и перераб. - М.: Машиностроение, 1977. 416 с.
- [3] Кулаков Ю. М., Хрульков В. А. Отделочно-защитная обработка деталей. - М.: Машиностроение, 1979. - 216 с.
- [4] Отделочные операции в машиностроении: Справочник под общ. ред. П. А. Руденко, К. Техника, 1985, 136 с.
- [5] Справочник технолога-машиностроителя/К. Ф. Антиков, Б. И. Горбунов, С. Н. Калашников и др./Под ред. А. Г. Косиловой, Р. К. Мещерякова. - М.: Машиностроение, 1972. - Т. 1. 694 с.
- [6] Хрульков В. А., Головань А. Я., Федотов А. И. Алмазные инструменты в прецизионном приборостроении. М., „Машиностроение“, 1977.
- [7] Кузманов Т., Х. Метев. Технология на машиностроенето ч.2 (Технологически методи за обработване). Изд. „ЕКС-ПРЕС“ ООД – Габрово, Г., 2005. (ISBN 954-9442-07-1).
- [8] Кузманов Т., Х. Метев. Електрофизични и електрохимични технологии за обработване в машиностроенето. Изд. „ЕКС-ПРЕС“ ООД – Габрово, Г., 2009. (ISBN 978-954-490-061-8).
- [9] Рашев Г., Ив. Митев. Материалознание, Изд. „ЕКС-ПРЕС“ ООД – Габрово, Г., 2011 (ISBN 978-954-490-050-2).
- [10] Maximov J. T., Dunchева G. V. Methods, devices and tools for enhancement of fatigue life of structural components with natural concentrators. Journal of Technical University of Gabrovo 50 (2014) 3-14.