ІННОВАЦІЙНІ ТЕХНОЛОГІЇ ПІДВИЩЕННЯ РЕСУРСУ НЕСУЧИХ ЕЛЕМЕНТІВ ГАЗОТУРБІННИХ ДВИГУНІВ

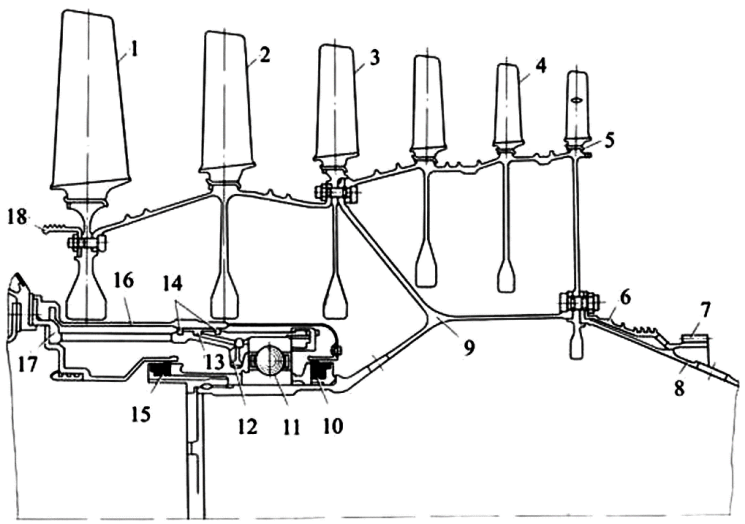
Лавріненков Антон Дмитриевич НТУУ «КПІ ім. Ігоря Сікорського»
Уланов Сергій Олександрович НУ «Запорізька політехніка»
Зілінський Андрій Іванович НТУУ «КПІ ім. Ігоря Сікорського»

2021

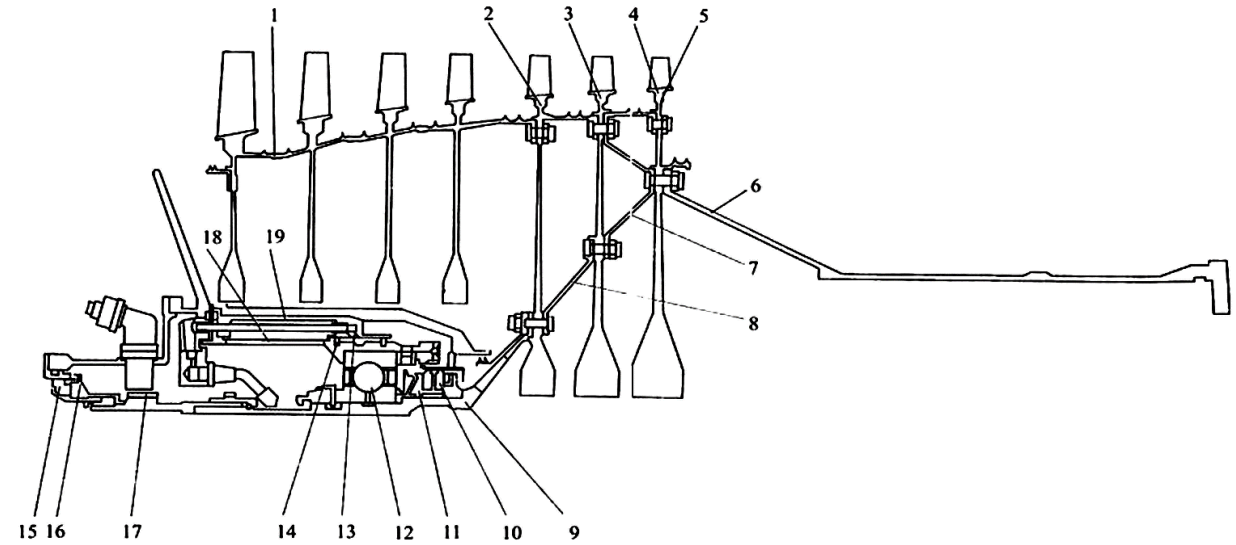
ПЕРСПЕКТИВИ ВИКОРИСТАННЯ ІННОВАЦІЙНИХ ТЕХНОЛОГІЙ ПОВЕРХНЕВОЇ ОБРОБКИ НЕСУЧИХ ЕЛЕМЕНТІВ ГАЗОТУРБІННИХ ДВИГУНІВ

Ротор осьового компресора газотурбінного двигуна (ГТД)

Ротор компресора низького тиску (КНТ)

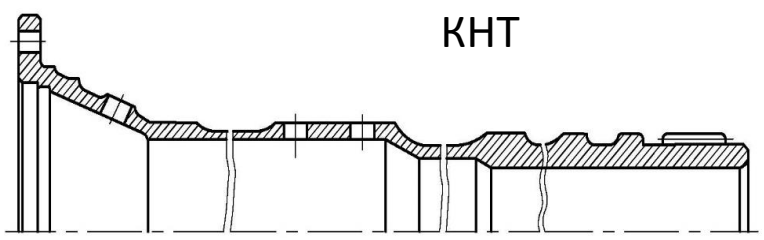


Ротор компресора високого тиску (КВТ)

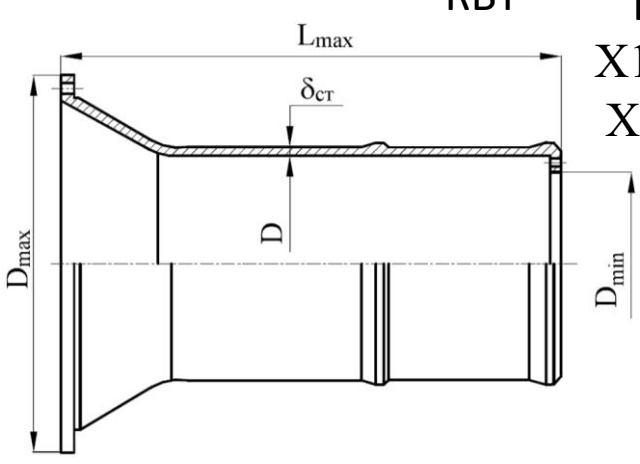


Вали

КНТ



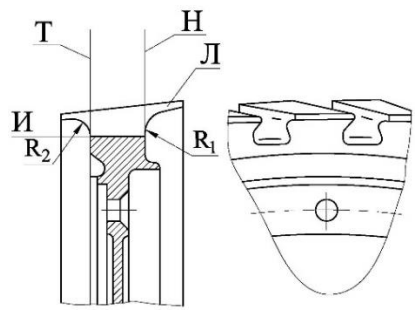
КВТ



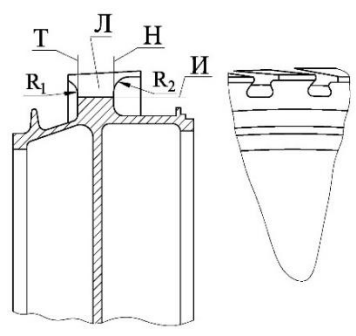
Матеріал:
Х12НМБФ-Ш
Х77ТЮР-ВД
та ін.

Диски

КНТ

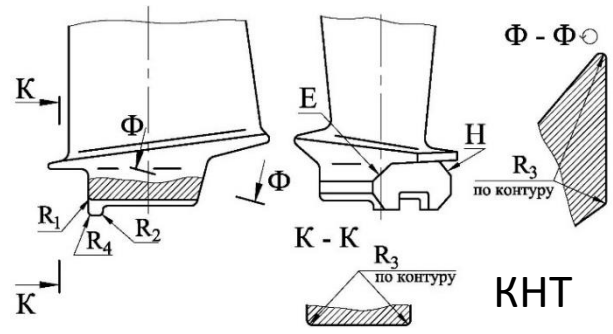


КВТ



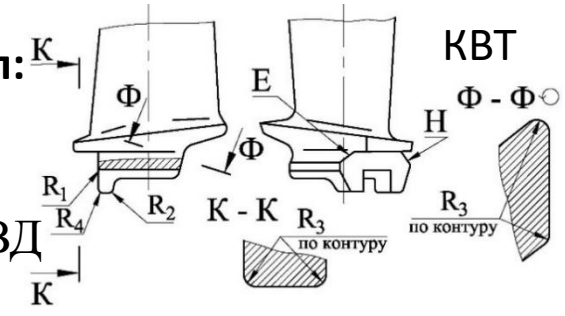
Матеріал:
ВТ3-1
ВТ-9
ЭИ698-ВД

Лопатки



КНТ

Матеріал:
ВТ3-1
ВТ-8
ЭИ437Б-ВД
та ін.



КВТ

Фінішні методи обробки

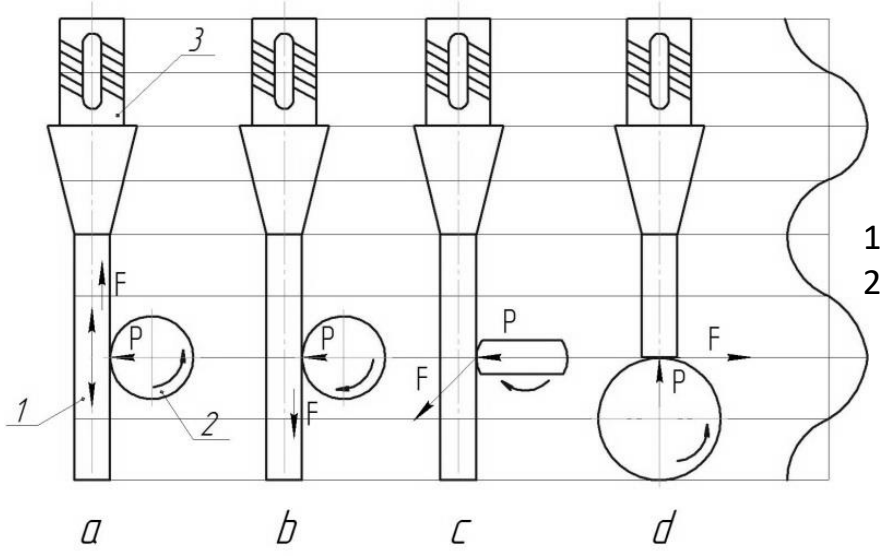
- Алмазне вигладжування (АВ)
- Обробка в псевдозрідженому шарі абразиву (ПША)

- Алмазне вигладжування
- Обробка в псевдозрідженому шарі абразиву

- Віброабразивний метод

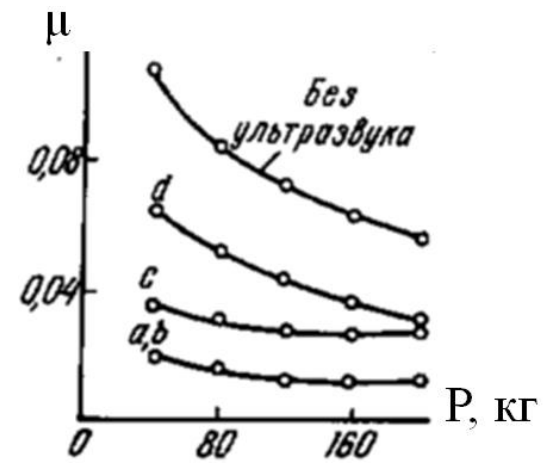
АЛМАЗНЕ ВИГЛАДЖУВАННЯ З УЛЬТРАЗВУКОМ (УЗ) (ІНФ. ОГЛЯД)

Схеми коливальних систем для дослідження впливу ультразвуку на контактне тертя:

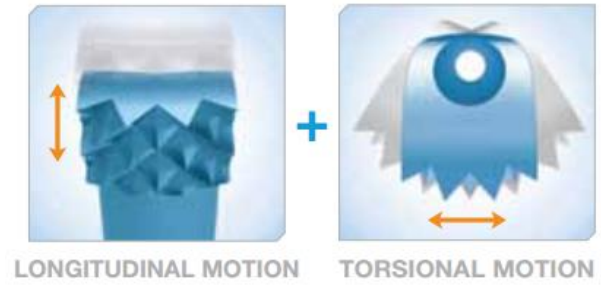


1 – УЗ інструмент
2 - деталь

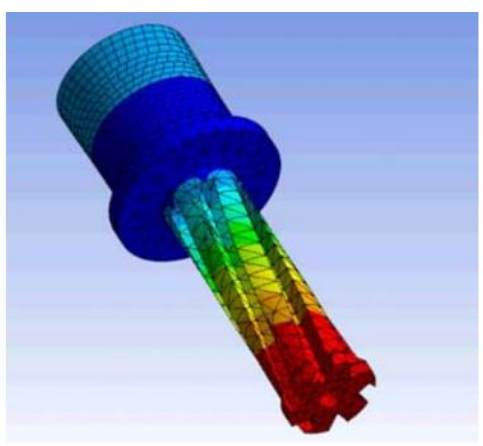
Вплив УЗК на коефіцієнт контактного тертя



Використання поздовжньо-крутильних коливань в хірургічному інструменті

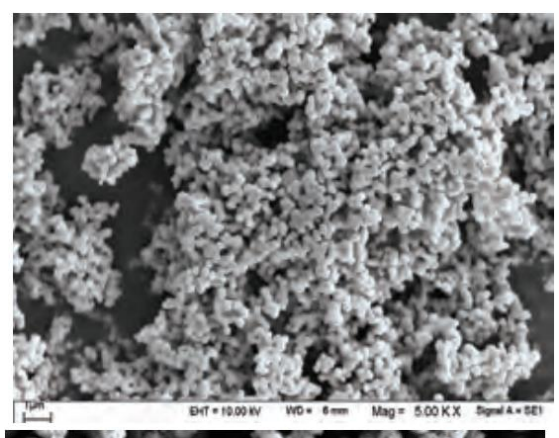


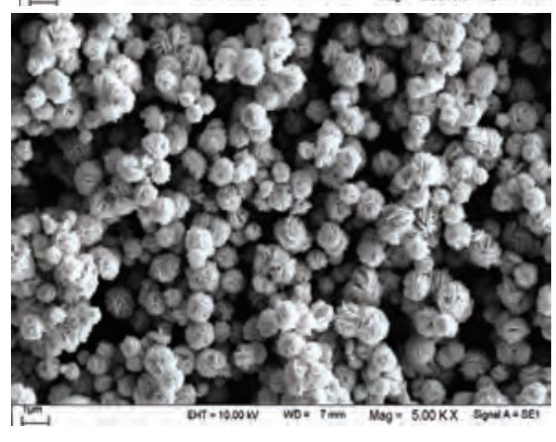
Ультразвуковой инструмент для создания продольно-крутильных колебаний



Застосування композиційних мастильних матеріалів при контактній взаємодії

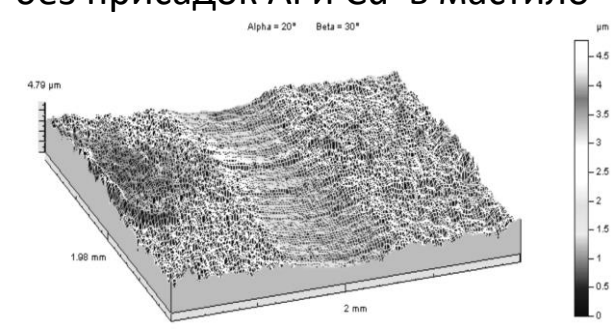
Мікро та нанопорошки пластичних матеріалів



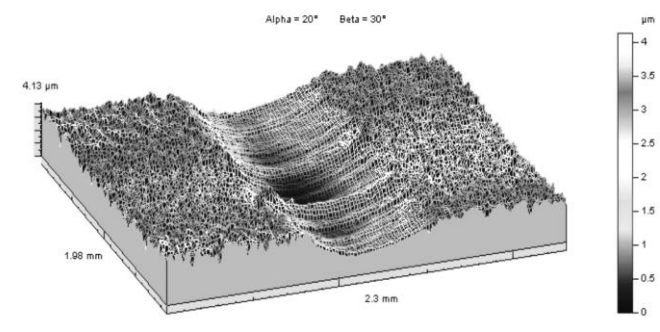


Якість поверхні

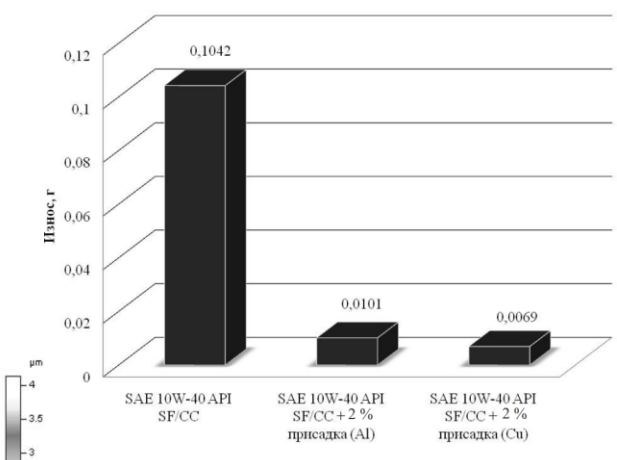
без присадок Al и Cu в мастило



з присадками Al и Cu в мастило



Шорсткість поверхні



ОБРОБКА ДЕТАЛЕЙ У ПСЕВДОРОЗРІДЖЕНОМУ ШАРІ АБРАЗИВУ

Псевдозрідження – перетворення шару зернистого матеріалу в псевдогомогенну систему під впливом зрідженого агента (газу або рідини)

Схема псевдозрідження абразиву

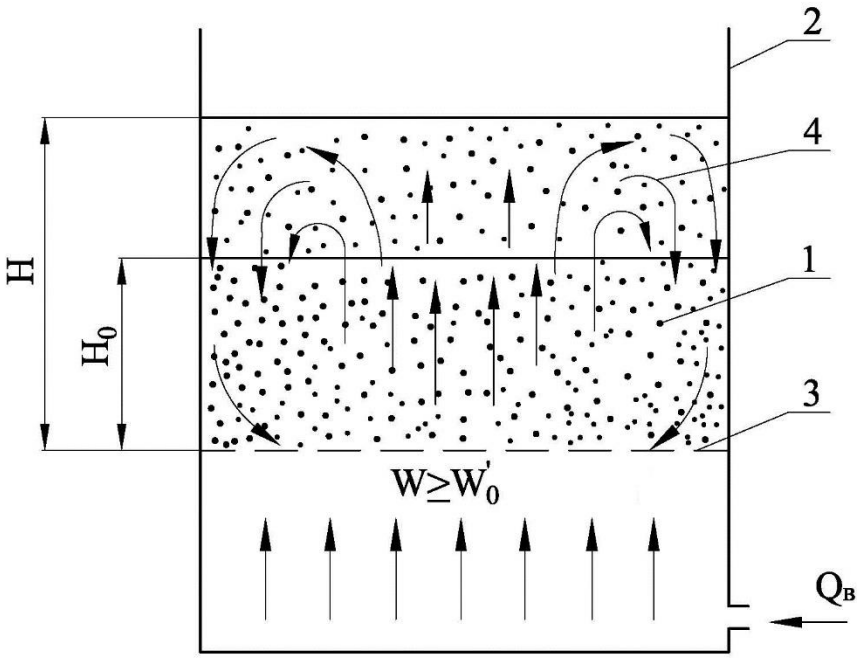


Схема обробки дисків компресора в ПША з повітряними соплами

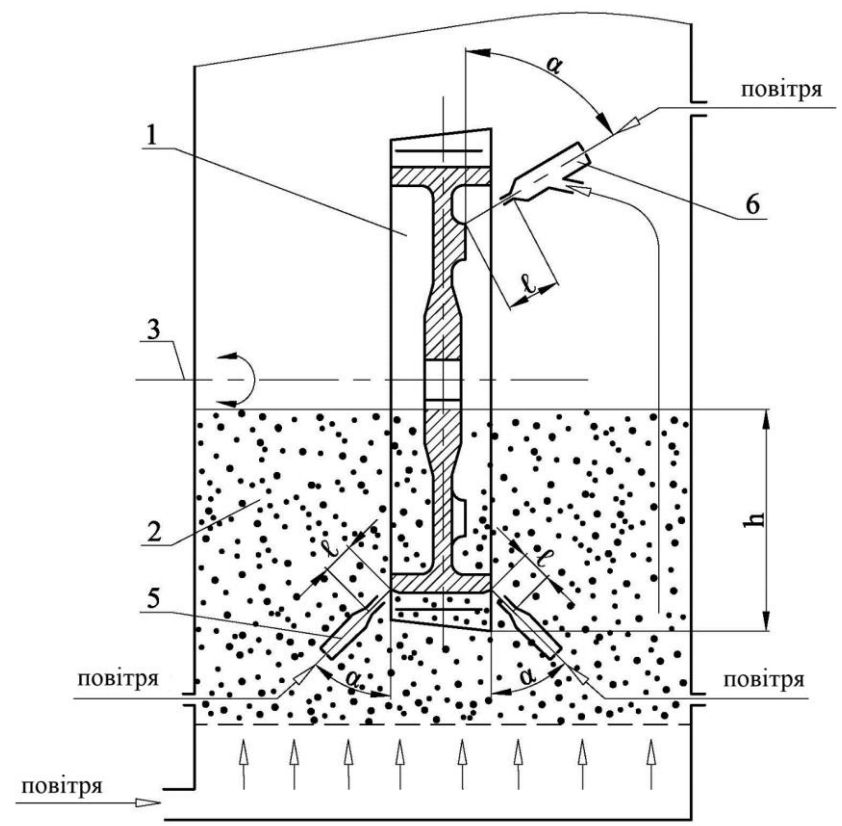


Схема обробки дисків компресора з оболонками в ПША з повітряними соплами

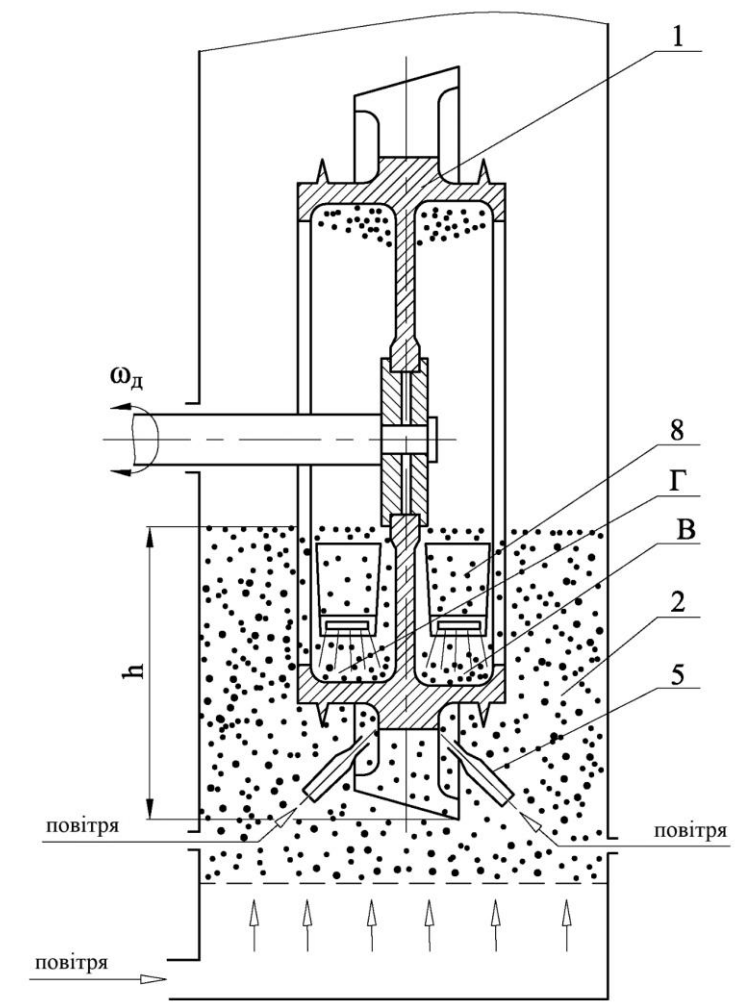
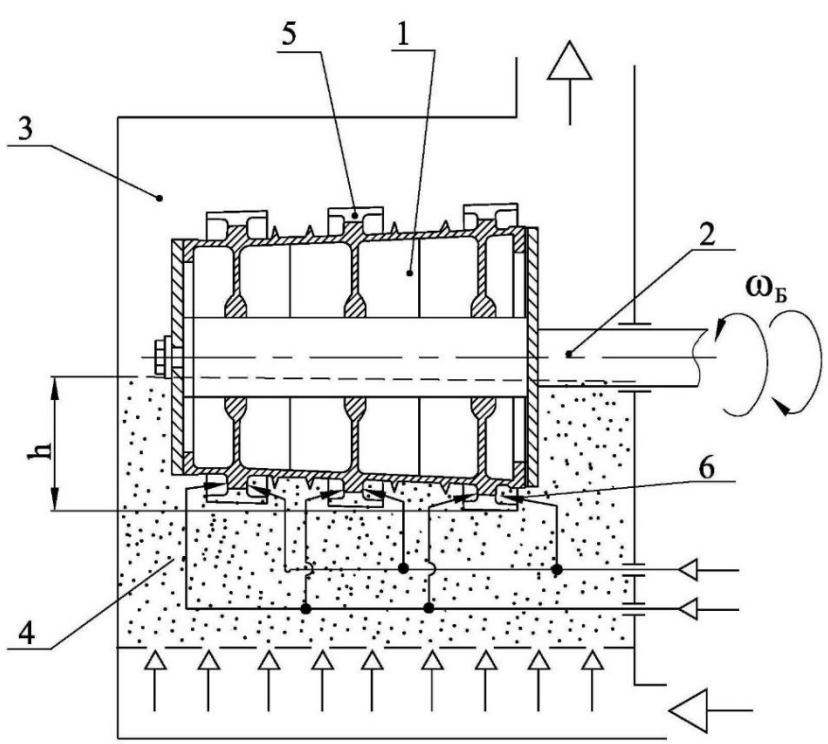


Схема обробки зварних барабанів роторів компресорів ГТД у ПША



МЕТА ДОСЛІДЖЕННЯ

Впровадження інноваційних технологій підвищення ресурсу несучих елементів газотурбінних двигунів

ЗАДАЧІ ДОСЛІДЖЕННЯ

1. **Впровадження інноваційних технологій поверхневої обробки деталей в присутності ультразвуку та металовмісних мастил;**
2. **Впровадження інноваційних технологій поверхневої обробки деталей ГТД у псевдорозрідженому шарі абразиву;**
3. **Впровадження інноваційних технологій підвищення параметрів якості деталей ГТД з урахуванням технологічної спадковості і релаксації залишкових напружень.**

Об’єкт дослідження - процес ультразвукового вигладжування титанових сплавів з використанням металовмісного мастила та оснащення для його реалізації. Процес обробки деталей ротора компресора ГТД у псевдорозрідженому стані. Процеси підвищення параметрів якості робочих лопаток компресора ГТД з урахуванням технологічної спадковості видів обробки та релаксації залишкових напружень.

Предмет дослідження - закономірності впливу параметрів контактної взаємодії індентора і деталі з урахуванням металовмісного мастила на формування зміцненого шару деталі з необхідними параметрами якості. Закономірності впливу параметрів обробки деталей у псевдорозрідженому стані на геометричні параметри та механічні властивості поверхневого шару деталі. Закономірності формування залишкових напружень у приповерхневому шарі з урахуванням технологічної спадковості. Закономірності релаксації залишкових напружень у приповерхневому шарі в залежності від їхньої температурної експозиції.

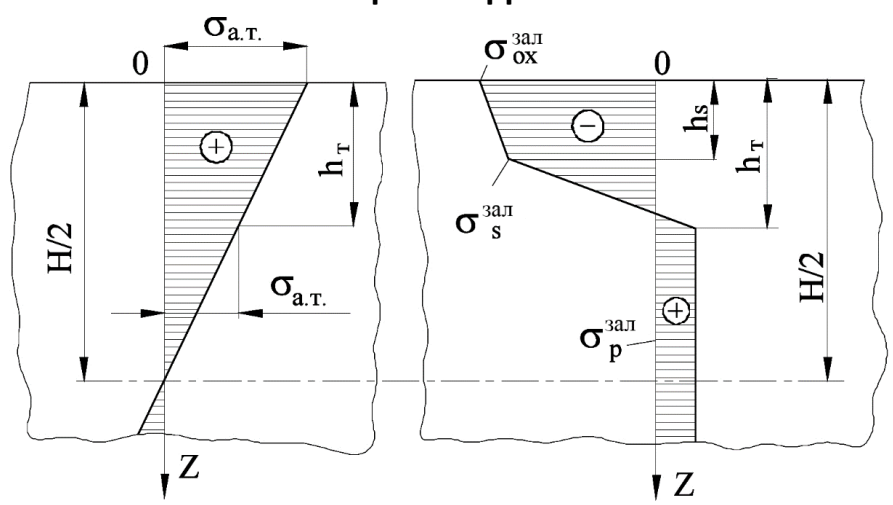
ТЕОРЕТИЧНИЙ АНАЛІЗ ПРОЦЕСУ ДЕФОРМУВАННЯ ДЕТАЛІ ПРИ ПОВЕРХНЕВІЙ ЗМІЦНЮВАЛЬНІЙ ОБРОБЦІ

Закономірності формування параметрів поверхневого шару тонкостінних деталей від інтенсивності залишкової деформації при їх зміцнювальній обробці

Глибина hт пластично-деформованого шару металу є одним з найважливіших критеріїв, що має істотне практичне значення, оскільки вона характеризує його механічний стан

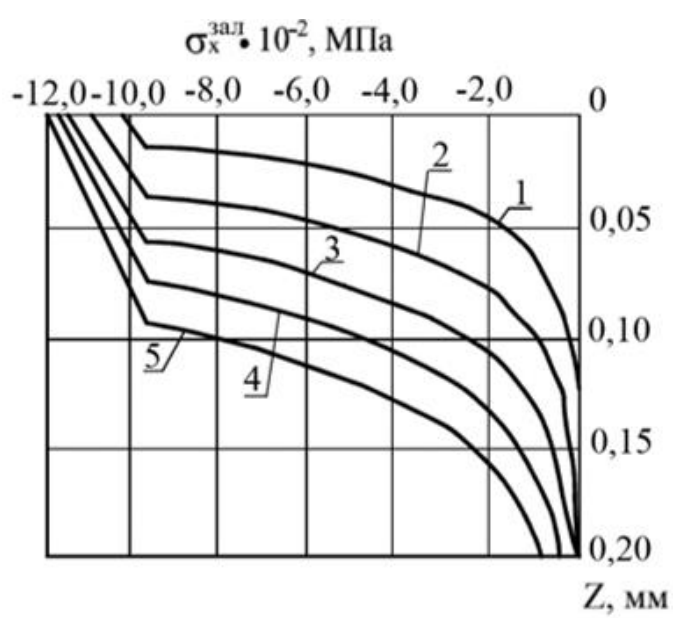
Оброблюваний матеріал: сплав ВТ8

Розрахункові схеми розподілу граничних робочих (а) і залишкових (б) напружень у поперечному перерізі зміцненої деталі



а б

Епюри залишкових напружень при дробоударній обробці закріплених пластин з титанового сплаву ВТ8

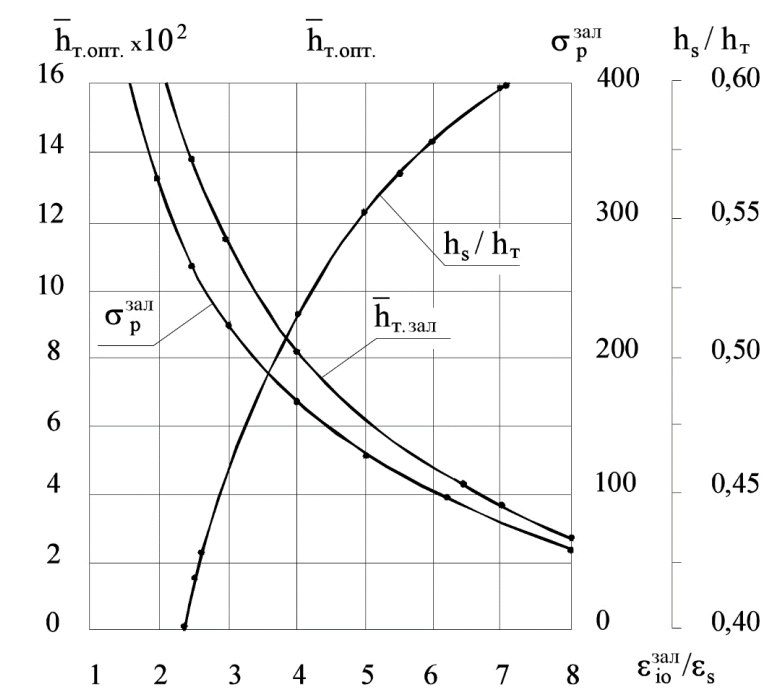


$1 - \varepsilon_{вих}^{зал} = 2\%;$
$2 - \varepsilon_{вих}^{зал} = 4\%;$
$3 - \varepsilon_{вих}^{зал} = 6\%;$
$4 - \varepsilon_{вих}^{зал} = 8\%;$
$5 - \varepsilon_{вих}^{зал} = 10\%$

Визначення оптимальної глибини зміцненого шару

$$\bar{h}_{т.опт} = \frac{h_{т.опт}}{D} = \frac{5}{8}\left[\frac{\bar{S}_в + 2{,}4}{\bar{S}_в + 3{,}0} - \left(\frac{\bar{S}_в}{\bar{S}_в + 3{,}0}\right)^{\frac{1}{2}}\right]$$

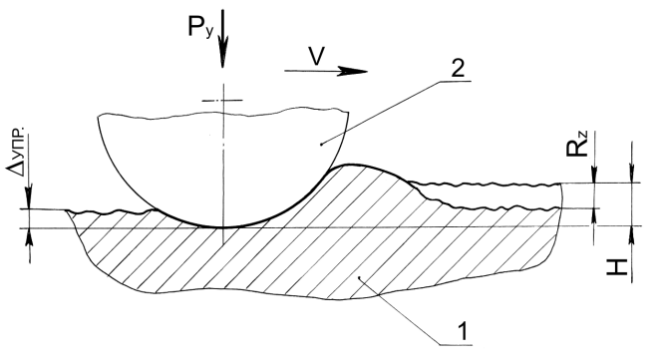
Залежності оптимальної глибини $\bar{h}_{т.опт}$ зміцненого шару, залишкових розтягувальних напружень $\sigma_p^{зал}$ і глибини (hs/hт) вторинного пластично деформованого шару від інтенсивності залишкової деформації ($\varepsilon_{io}^{ост}/\varepsilon_s$) поверхневого шару



ТЕОРЕТИЧНИЙ АНАЛІЗ ПРОЦЕСУ АЛМАЗНОГО ВИГЛАДЖУВАННЯ

Кинематика взаимодействия индентора с поверхностью детали

Реальний метал



I – зона осередку пластичної деформації
II – зона пружного відновлення матеріалу
III – зона позаконтактної деформації

Розрахункова модель

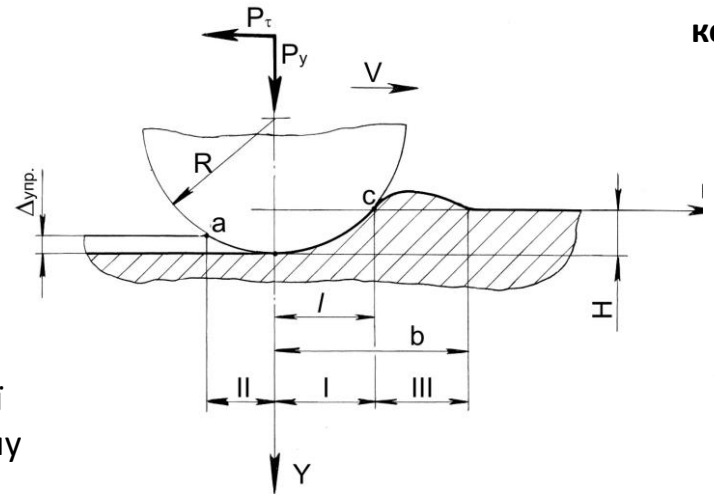


Схема переміщення матеріальних точок у вертикальному напрямку на контактній поверхні в залежності від швидкості обробки

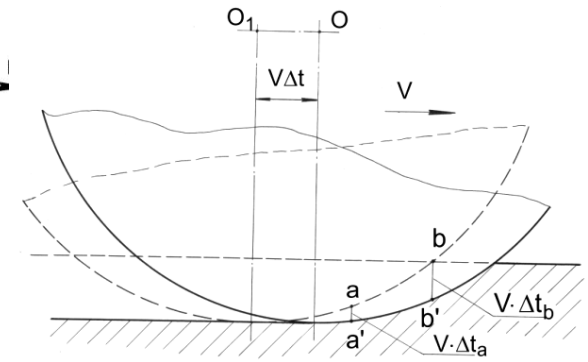
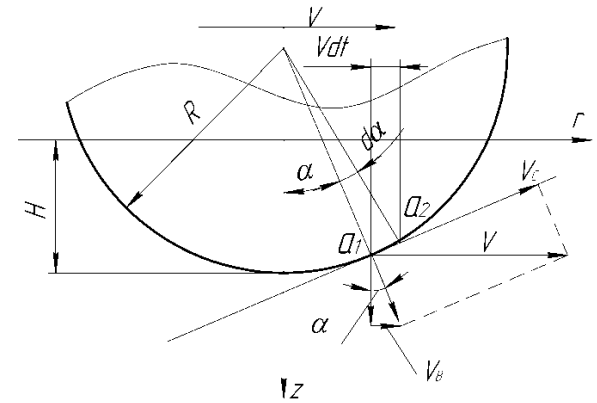


Схема для визначення функції швидкості переміщення матеріальних точок на контактній поверхні при вигладжуванні



Співвідношення між швидкістю обробки V і швидкістю переміщення матеріальних точок Vв

$$dV_в = V \cdot tg(\arcsin\frac{Vdt}{R})$$

$$\downarrow$$

$$V_в = \frac{-V^2}{R}\left(\frac{1}{V} - t\right) = \frac{V}{R}(l - Vt)$$

Кінематична модель швидкості переміщення матеріальних точок поверхневого шару

$$\vec{V_0} = \vec{V_{вд}} + \vec{V_{сд}}$$

Vвд - вектор швидкості матеріальних точок при вдавлюванні інструменту
Vсд - вектор швидкості матеріальних точок вздовж поверхні за рахунок сил тертя

Складові швидкості переміщення частинок металу в області деформування

$$V_z = V\left(\frac{r^2}{l^2} - 1\right)\exp\left(-m\frac{r^2}{l^2}\right)\left(1 - \frac{z}{kl}\right)^2$$

$$V_r = -\frac{r}{kl}V\exp\left(-m\frac{r^2}{l^2}\right)\left(1 - \frac{z}{kl}\right)$$

Компоненти швидкостей деформацій

$$\varepsilon_{zz} = -\frac{2}{kl}V\left(\frac{r^2}{l^2} - 1\right)\exp\left(-m\frac{r^2}{l^2}\right)\left(1 - \frac{z}{kl}\right)^2$$

$$\varepsilon_{rr} = -\frac{1}{kl}V\exp\left(-m\frac{r^2}{l^2}\right)\left(1 - \frac{z}{kl}\right)\left(1 - 2m\frac{r^2}{l^2}\right)$$

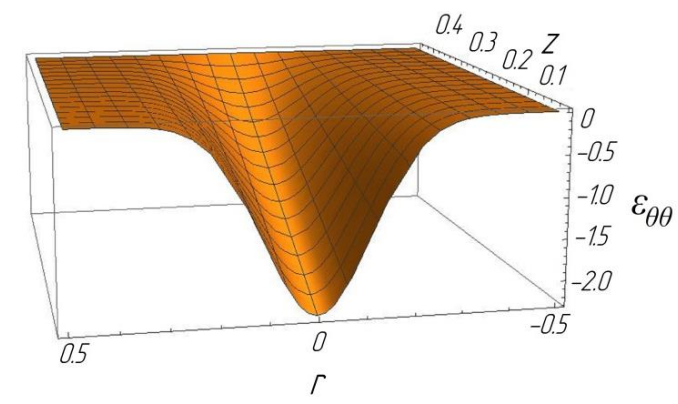
$$\varepsilon_{\theta\theta} = -\frac{1}{kl}\left(1 - \frac{z}{kl}\right)V\exp\left(-m\frac{r^2}{l^2}\right)$$

$$\varepsilon_{zr} = \frac{rV}{l^2}\left[2 - 2m\left(\frac{r^2}{l^2} - 1\right) + \frac{1}{k^2}\right]\exp\left(-m\frac{r^2}{l^2}\right)$$

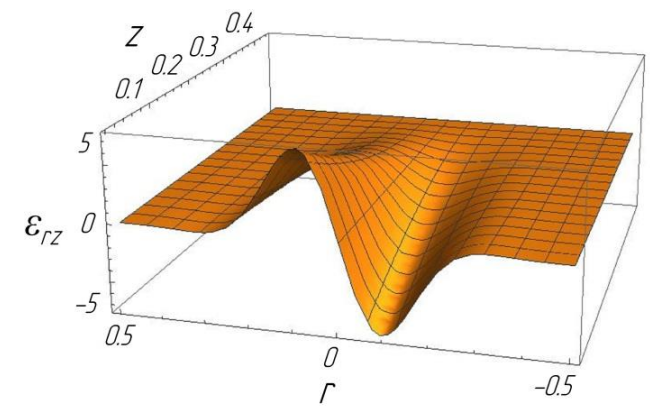
$$\varepsilon_{r\theta} = 0; \quad \varepsilon_{\theta z} = 0.$$

Розподіл швидкостей деформацій

окружних



зсувних



Теоретичний аналіз процесу алмазного вигладжування із металовмісним мастилом

Модель контактної взаємодії

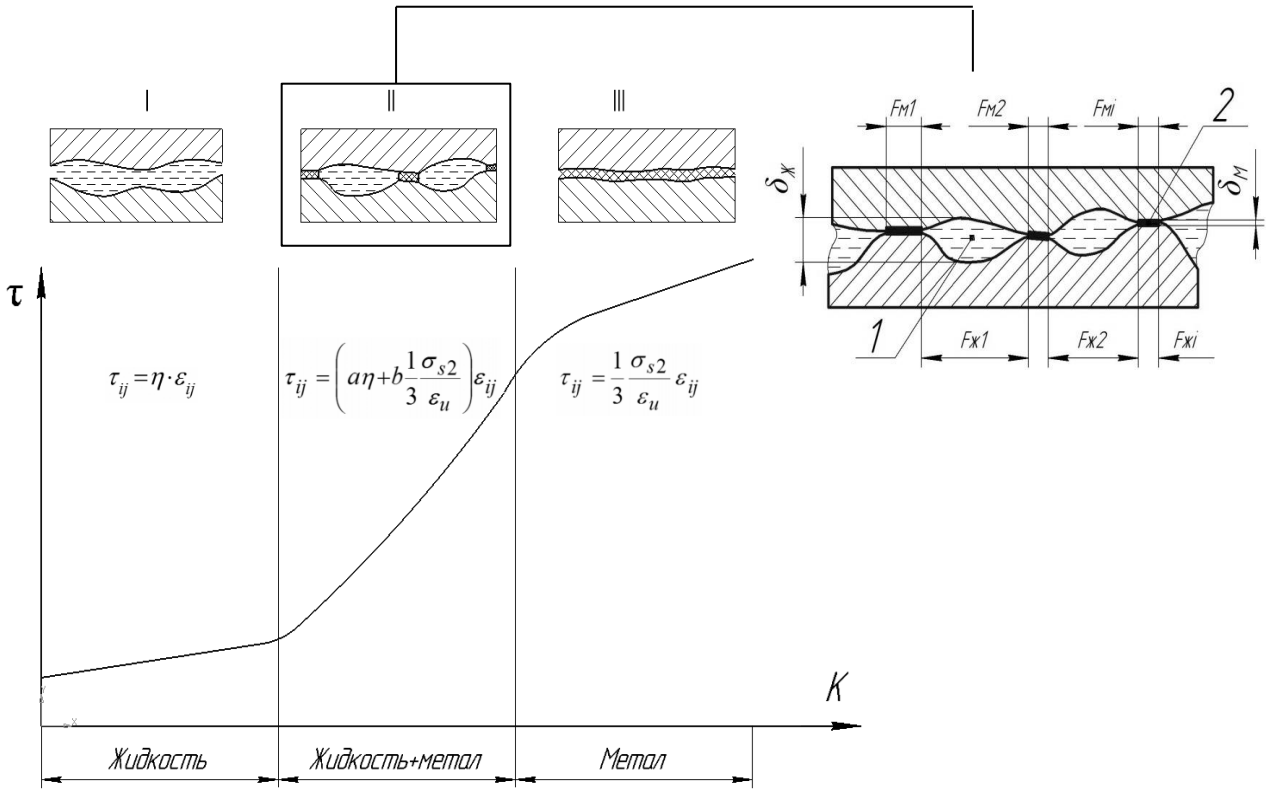
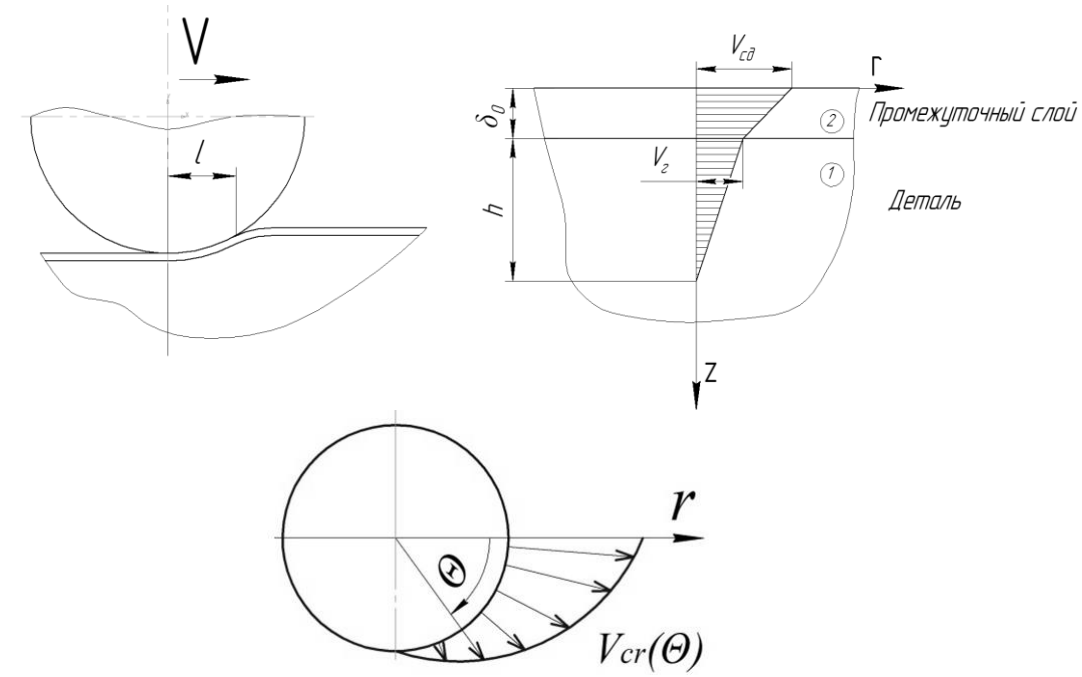
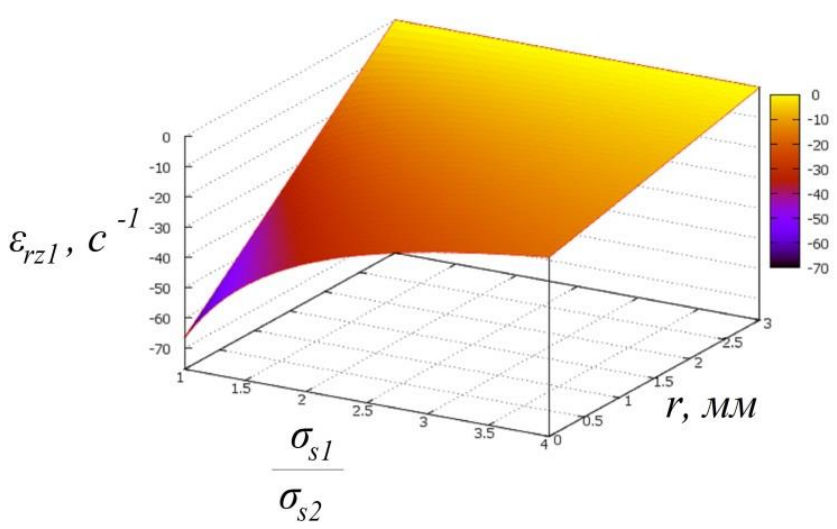


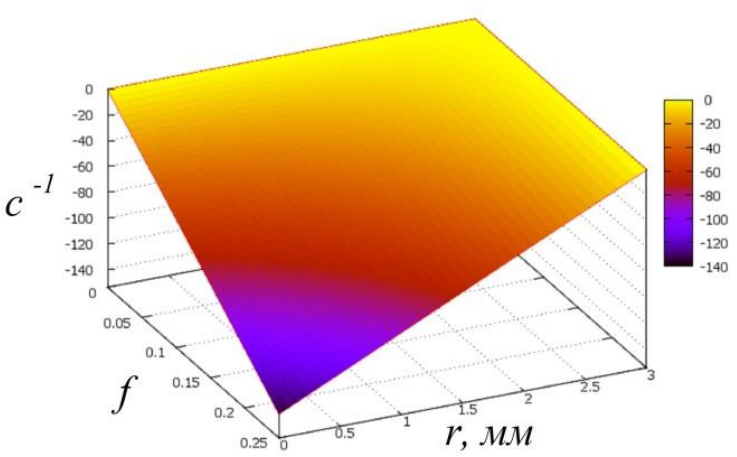
Схема вигладжування



Залежність деформації зсуву εrz1 основного шару в залежності від σ_{s1}/σ_{s2}



Залежність деформації зсуву εrz1 основного шару в залежності від коефіцієнта тертя fтр



Компоненти тензора швидкостей деформацій поверхневого шару деталі

$$\varepsilon_{rr}=\frac{1}{l}\sqrt{3}Vf_{\text{тр}}\frac{\sigma_{s2}h}{\sigma_{s1}\delta_0+\sigma_{s2}h}\left(\frac{z-\delta_0}{h}-1\right);$$

$$\varepsilon_{\theta\theta}=\frac{1}{l}\sqrt{3}Vf_{\text{тр}}\frac{\sigma_{s2}h}{\sigma_{s1}\delta_0+\sigma_{s2}h}\left(1-\frac{z-\delta_0}{h}\right);$$

$$\varepsilon_{zr}=\frac{1}{h}\sqrt{3}Vf_{\text{тр}}\frac{\sigma_{s2}h}{\sigma_{s1}\delta_0+\sigma_{s2}h}\left(\frac{r}{l}-1\right);$$

$$\varepsilon_{r\theta}=-\frac{4}{l}\sqrt{3}Vf_{\text{тр}}\frac{\sigma_{s2}h}{\sigma_{s1}\delta_0+\sigma_{s2}h}\left(1-\frac{z-\delta_0}{h}\right)\theta;$$

$$\varepsilon_{\theta z}=-\frac{1}{h}\sqrt{3}Vf_{\text{тр}}\frac{\sigma_{s2}h}{\sigma_{s1}\delta_0+\sigma_{s2}h}\left[1-\left(1-\frac{2r}{l}\right)\theta\right].$$

УЗАГАЛЬНЕНА КІНЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ ПРОЦЕСУ АЛМАЗНОГО ВИГЛАДЖУВАННЯ

Компоненти загального вектора швидкостей переміщення

$$V_z = V\left(\frac{r^2}{l^2} - 1\right)\exp\left(-m\frac{r^2}{l^2}\right)\left(1 - \frac{z}{kl}\right)^2;$$

$$V_r = -\frac{r}{kl}V \quad \exp\left(-m\frac{r^2}{l^2}\right)\left(1 - \frac{z}{kl}\right) + \sqrt{3}Vf_{\text{тр}}\frac{\sigma_{s2}h}{\sigma_{s1}\delta_0 + \sigma_{s2}h}\left[1 - \frac{z - \delta_0}{h}\right]\left(1 - \frac{r}{l}\right);$$

$$V_\Theta = \sqrt{3}Vf_{\text{тр}}\frac{\sigma_{s2}h}{\sigma_{s1}\delta_0 + \sigma_{s2}h}\left(1 - \frac{z - \delta_0}{h}\right)\left(\left(\frac{2r}{l} - 1\right)\theta + \frac{\pi}{2}\right).$$

Компоненти тензора швидкостей деформації

$$\varepsilon_{zz} = -\frac{2}{kl}V\left(\frac{r^2}{l^2} - 1\right)\exp\left(-m\frac{r^2}{l^2}\right)\left(1 - \frac{z}{kl}\right)^2;$$

$$\varepsilon_{rr} = -\frac{1}{kl}V\exp\left(-m\frac{r^2}{l^2}\right)\left(1 - \frac{z}{kl}\right)\left(1 - 2m\frac{r^2}{l^2}\right) + \frac{1}{l}\sqrt{3}Vf_{\text{тр}}\frac{\sigma_{s2}h}{\sigma_{s1}\delta_0 + \sigma_{s2}h}\left(\frac{z - \delta_0}{h} - 1\right);$$

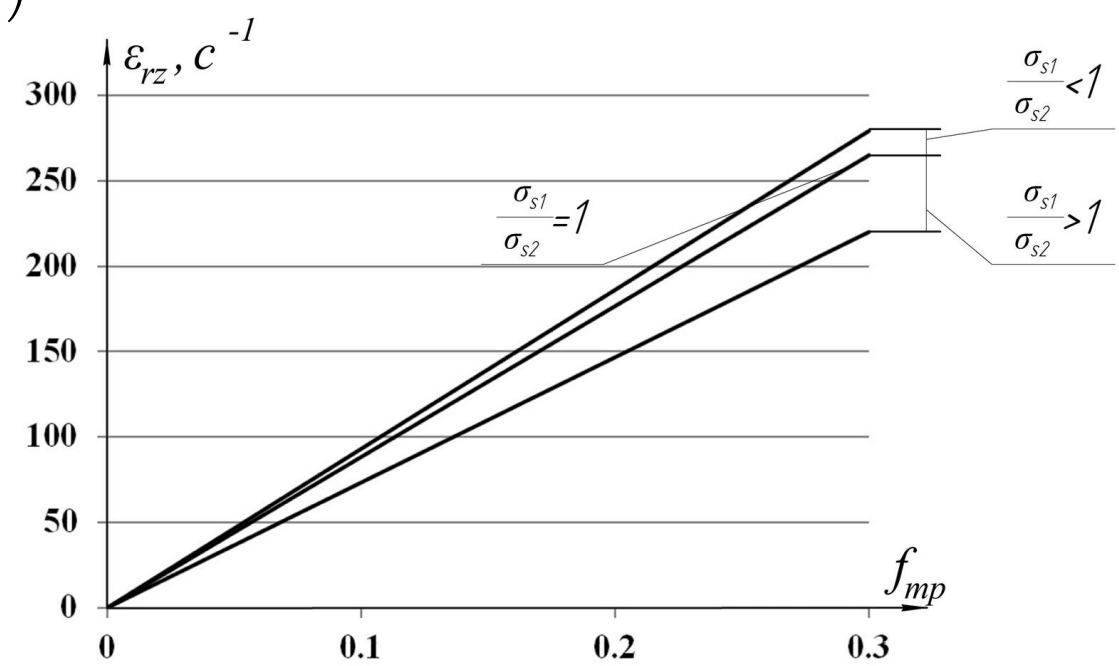
$$\varepsilon_{\theta\theta} = -\frac{1}{kl}\left(1 - \frac{z}{kl}\right)V\exp\left(-m\frac{r^2}{l^2}\right) + \frac{1}{l}\sqrt{3}Vf_{\text{тр}}\frac{\sigma_{s2}h}{\sigma_{s1}\delta_0 + \sigma_{s2}h}\left(1 - \frac{z - \delta_0}{h}\right);$$

$$\varepsilon_{zr} = \frac{rV}{l^2}\left[2 - 2m\left(\frac{r^2}{l^2} - 1\right) + \frac{1}{k^2}\right]\exp\left(-m\frac{r^2}{l^2}\right) + \frac{1}{h}\sqrt{3}Vf_{\text{тр}}\frac{\sigma_{s2}h}{\sigma_{s1}\delta_0 + \sigma_{s2}h}\left(\frac{r}{l} - 1\right);$$

$$\varepsilon_{r\theta} = -\frac{4}{l}\sqrt{3}Vf_{\text{тр}}\frac{\sigma_{s2}h}{\sigma_{s1}\delta_0 + \sigma_{s2}h}\left(1 - \frac{z - \delta_0}{h}\right)\theta;$$

$$\varepsilon_{\theta z} = -\frac{1}{h}\sqrt{3}Vf_{\text{тр}}\frac{\sigma_{s2}h}{\sigma_{s1}\delta_0 + \sigma_{s2}h}\left[1 - \left(1 - \frac{2r}{l}\right)\theta\right]$$

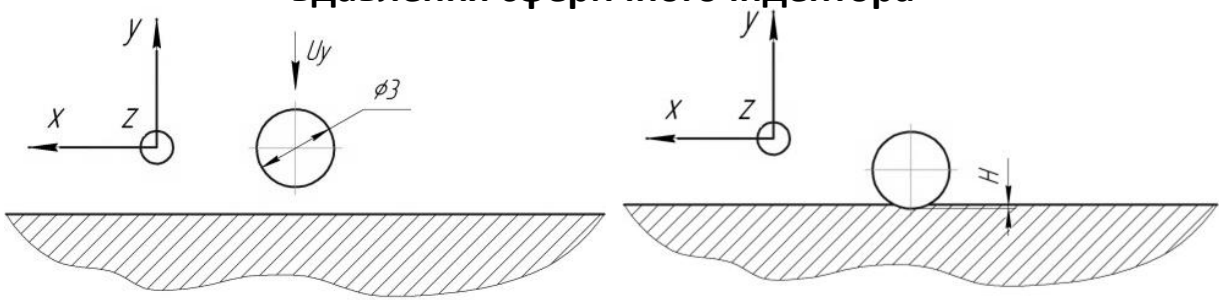
Залежність швидкості деформації εrz від коефіцієнта тертя при різних співвідношеннях механічних властивостей основного і проміжного шарів



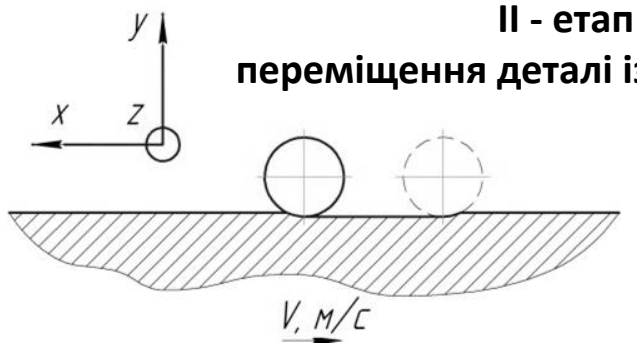
МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСУ ВИГЛАДЖУВАННЯ С/БЕЗ УЗ КОЛИВАНЬ

Вигладжування без УЗ

I - етап
вдавлення сферичного індентора

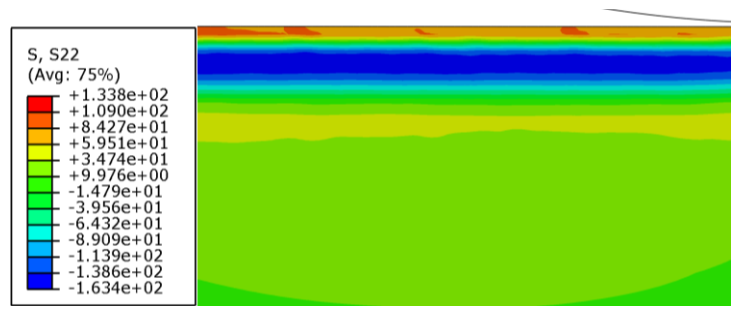


II - етап
переміщення деталі із швидкістю V

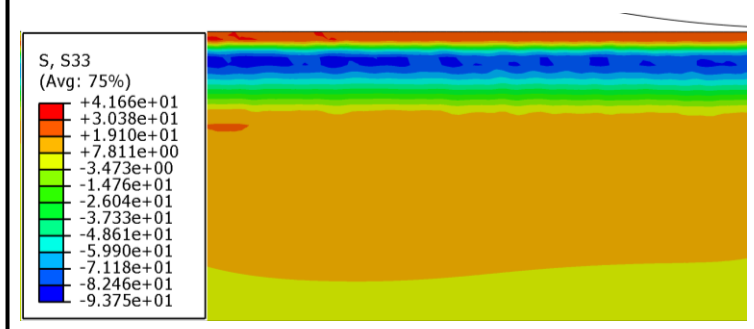


Аналіз НДС процесу вигладжування с/без УЗ коливань індентора

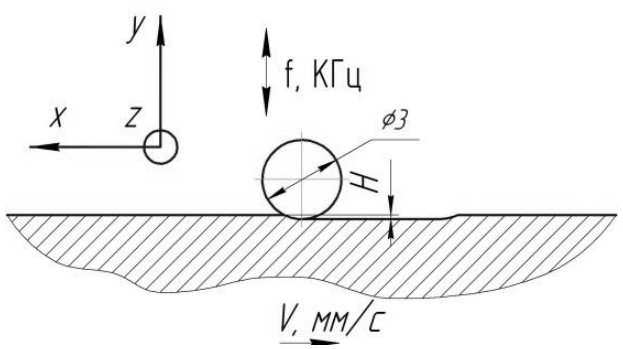
Розподіл напружень σx

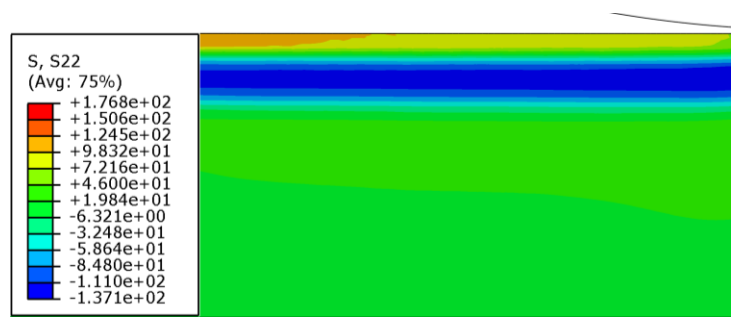


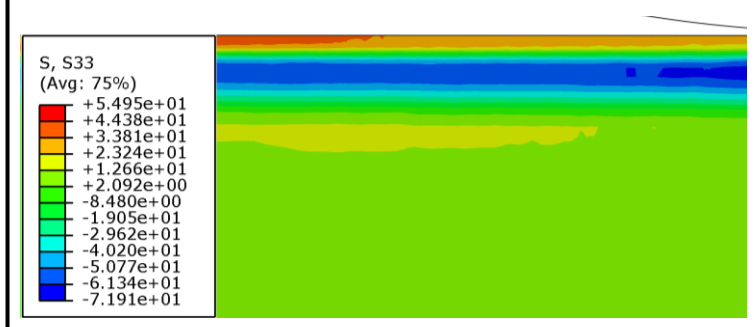
Розподіл напружень σz



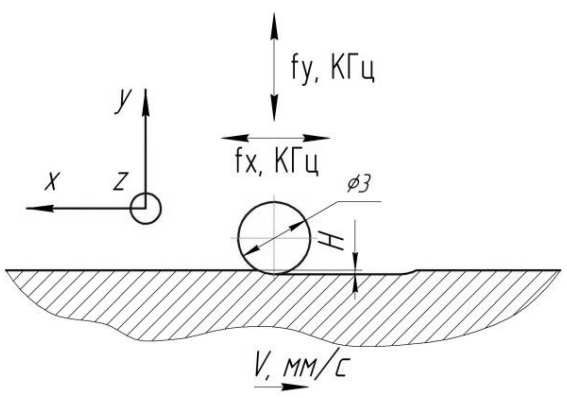
Вигладжування з УЗ поперечними коливаннями

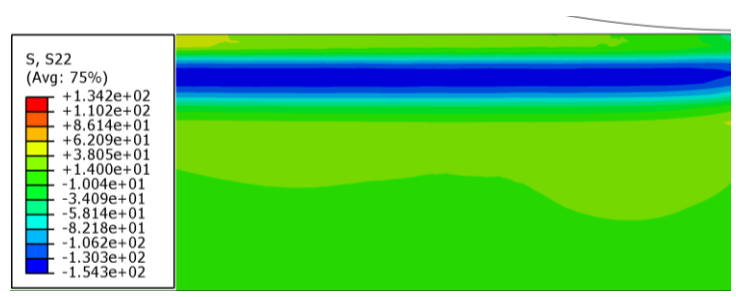


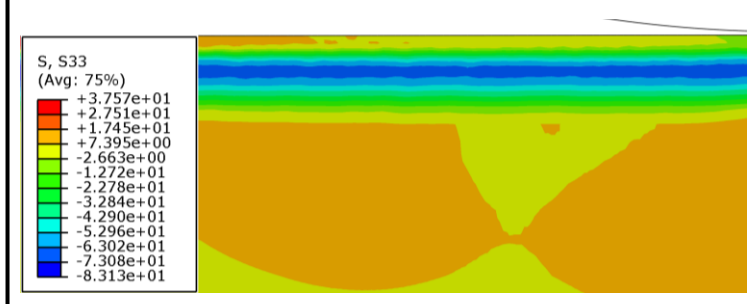




Вигладжування з УЗ поперечно-поздовжніми коливаннями





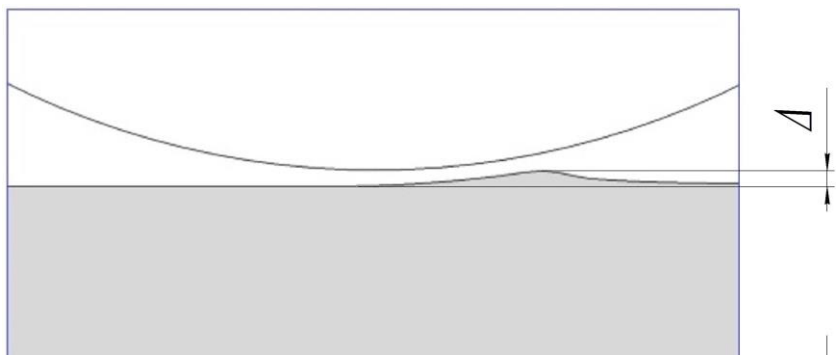


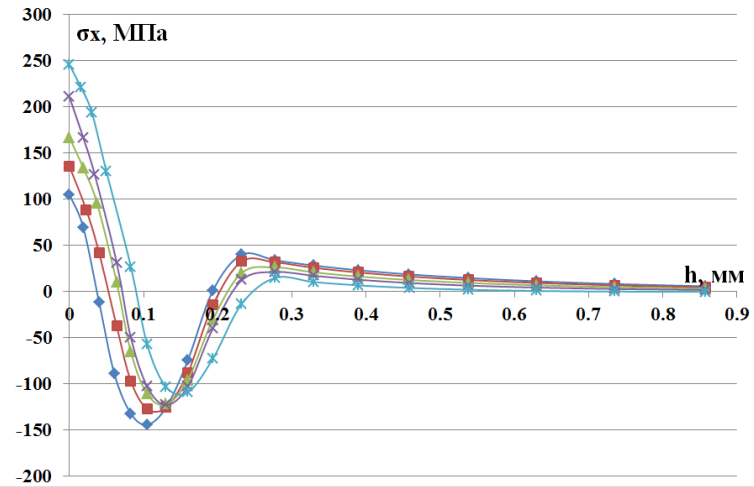
АНАЛІЗ НДС ПРОЦЕСУ ВЫГЛАДЖУВАННЯ С/БЕЗ УЗ КОЛИВАНЬ

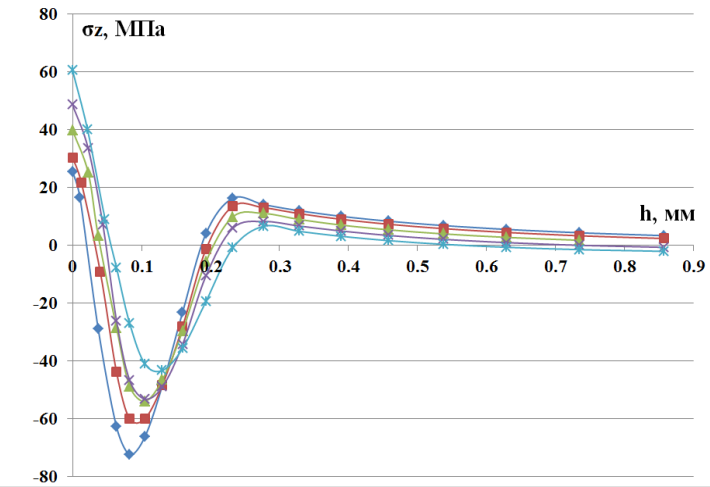
Величина зони позаконтрактної деформації

Вплив коефіцієнта тертий на НДС

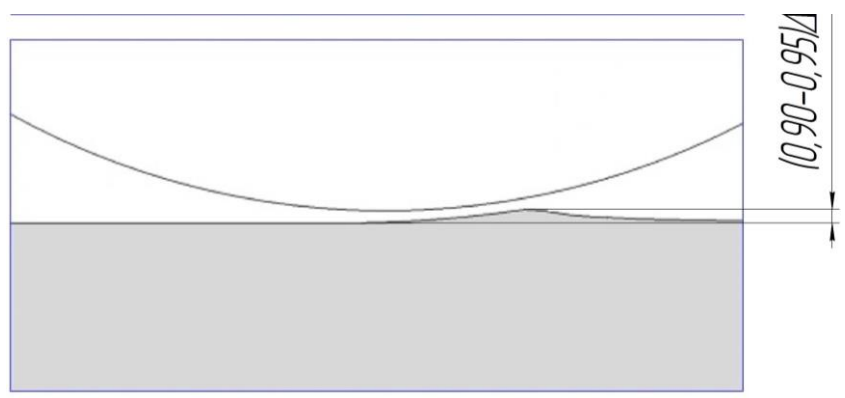
Вигладжування без УЗК

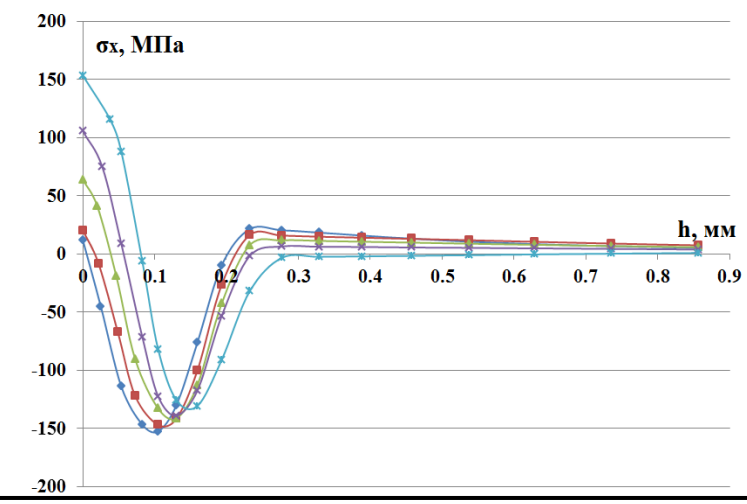


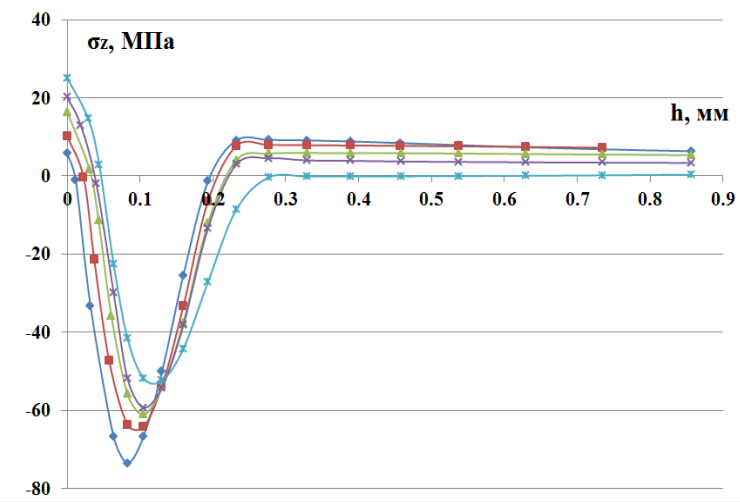




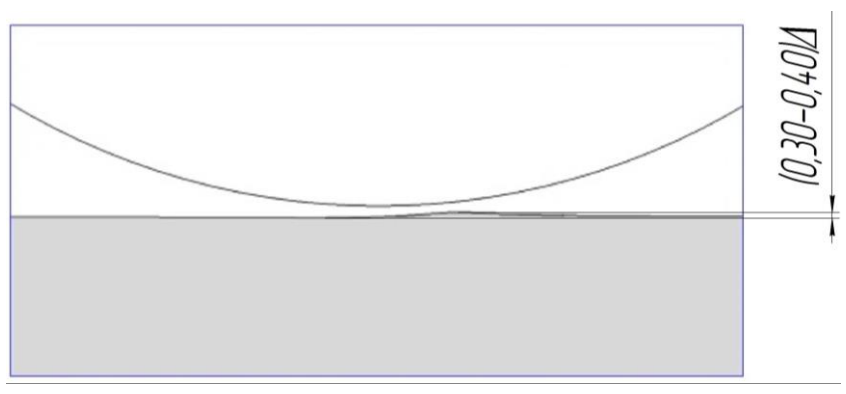
Вигладжування з поперечними УЗК

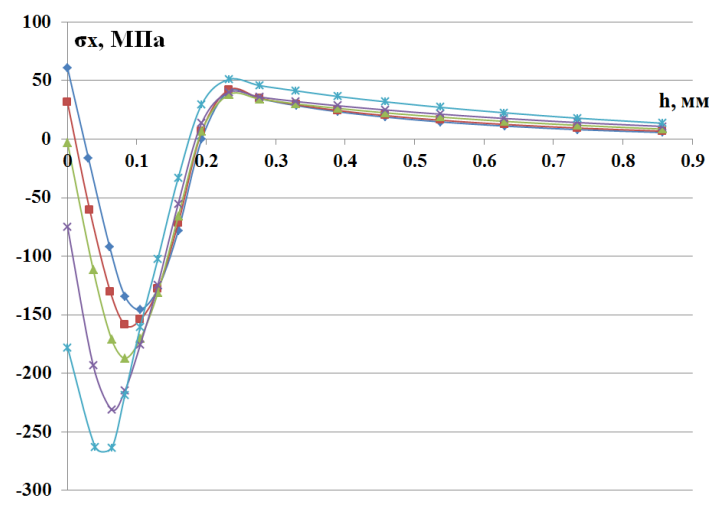


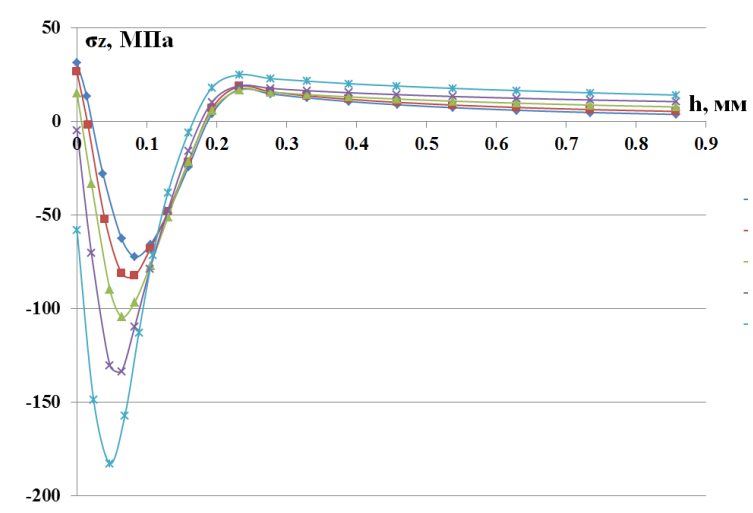




Вигладжування з поздовжньо-поперечними УЗК



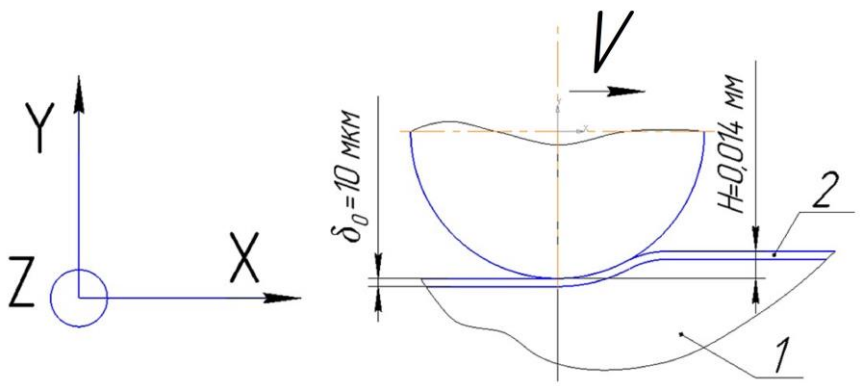




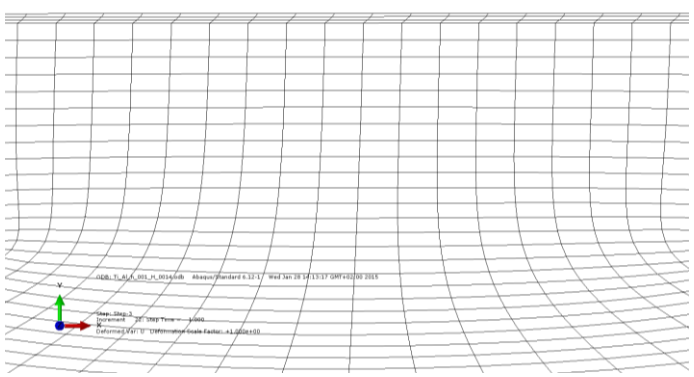
коефіцієнт тертя 0,00 0,08 0,15 0,2 0,3

МОДЕЛЮВАННЯ ВИГЛАДЖУВАННЯ БЕЗ УЗК З ПРОМІЖНИМ ПЛАСТИЧНИМ ШАРОМ

Схема процесу вигладжування основного матеріалу (1) з наявністю проміжного шару (2)



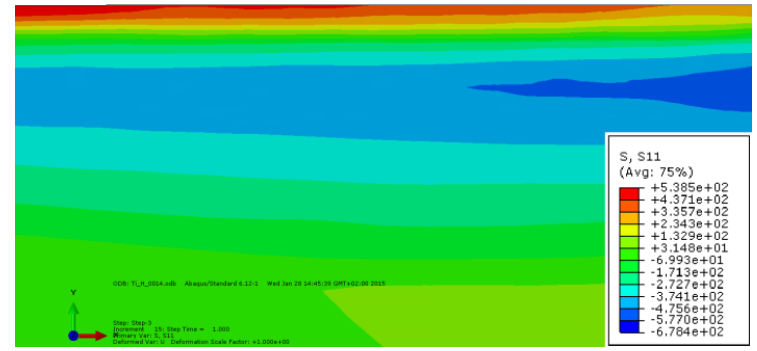
Сітка скінчених елементів після вигладжування з проміжним шаром (2)

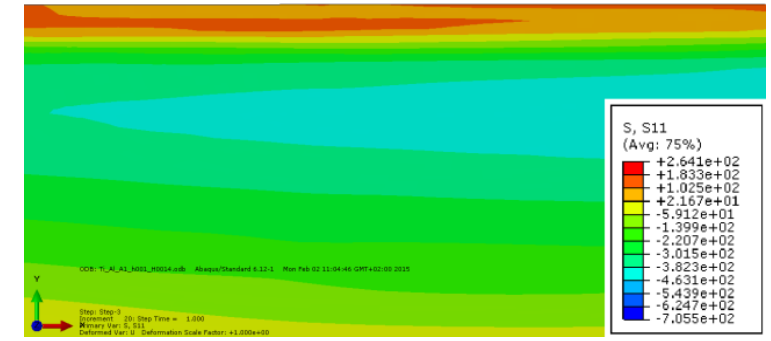


Вигладжування

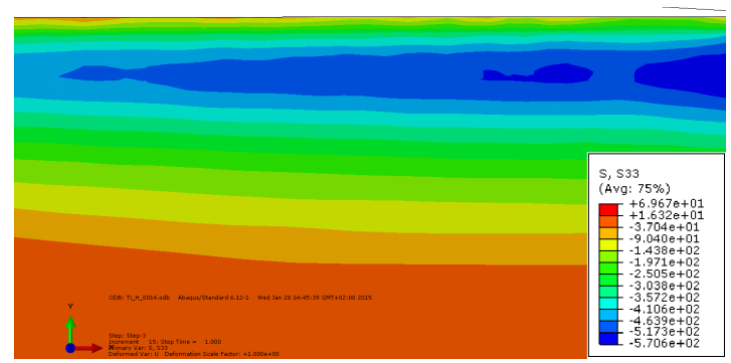
без проміжного шару **з проміжним шаром**

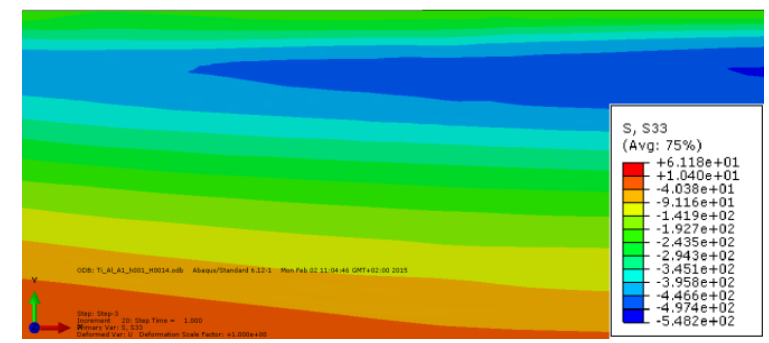
залишкові напруження σ_x



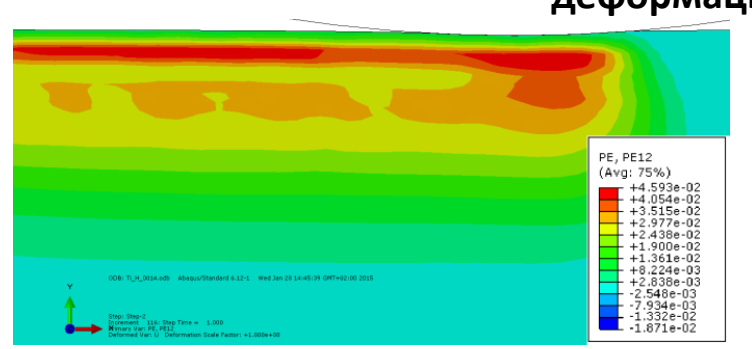


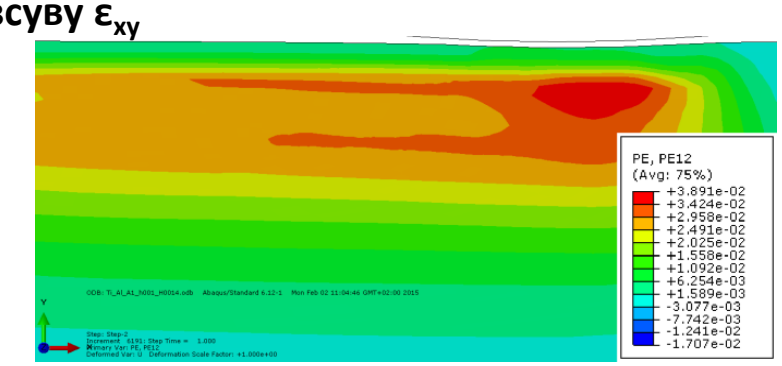
залишкові напруження σ_z



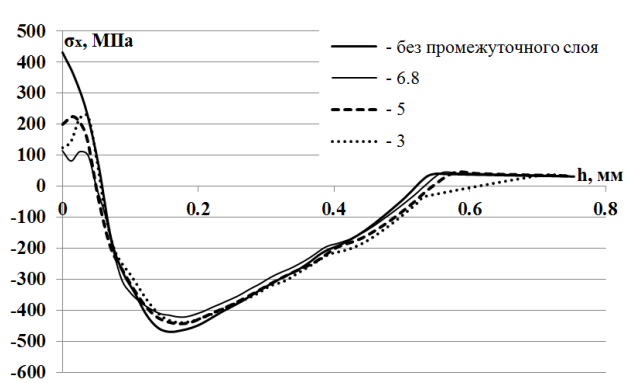


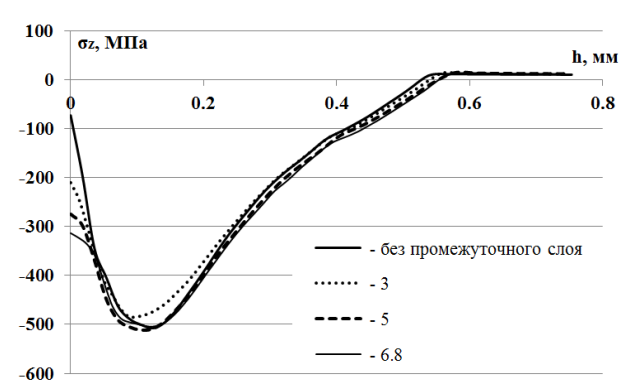
деформації зсуву ε_{xy}

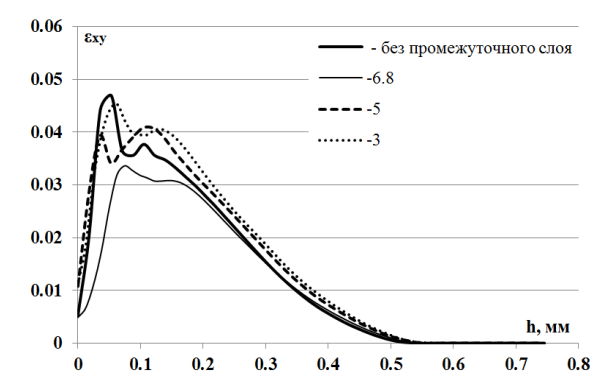




Розподіл залишкових напружень σ_x , σ_z та активних деформацій зсуву ε_{xy} по глибині

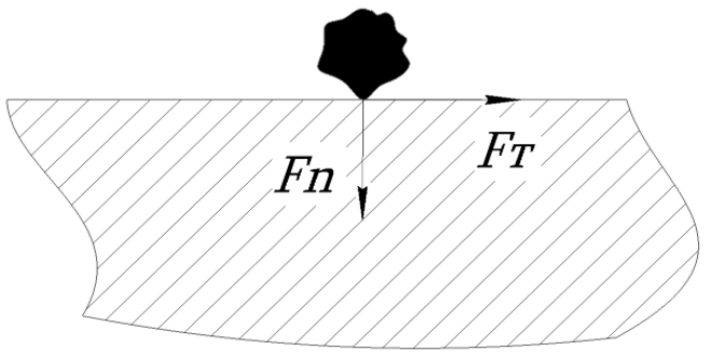






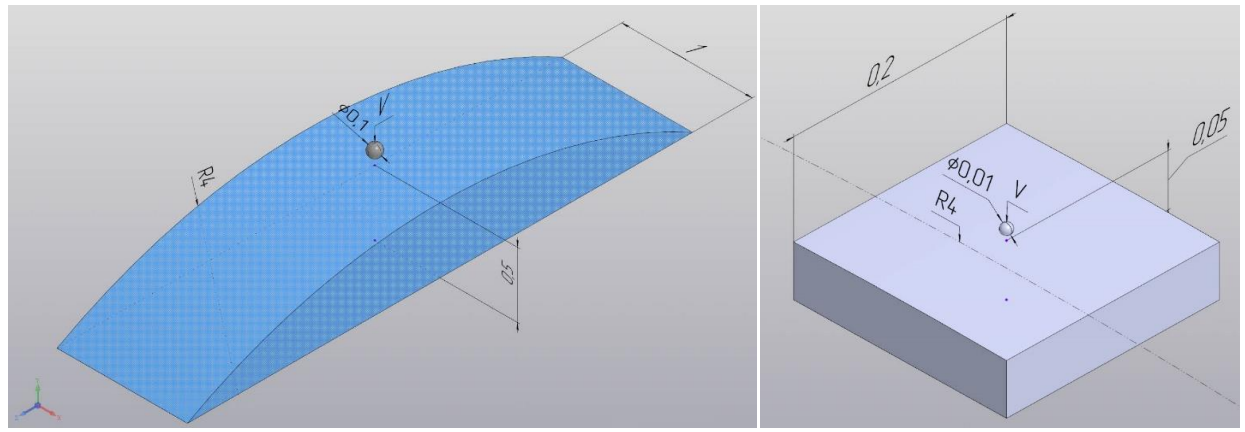
МОДЕЛЮВАННЯ УДАРНОЇ ВЗАЄМОДІЇ ЧАСТИНКИ СФЕРИЧНОЇ ФОРМИ З ДЕТАЛЛЮ ПРИ УЛЬТРАЗВУКОВОМУ НАВАНТАЖЕННІ

Силова схема ударної взаємодії сферичної частинки з поверхнею деталі



Модель для дослідження ударної взаємодії сферичної частинки (Fe2O3) ∅ 100 мкм (а) та ∅ 10 мкм (V=2000 м/с) з поверхнею нерухомої деталі (12Х18Н10Т та Ф4)

а б



Середнє зусилля

$$F_{\text{уср}} = \frac{F_{\text{у}}(h_y - \Delta h_y) + F_{\text{у}}(h_y)}{2}$$

h_y - пружна деформація

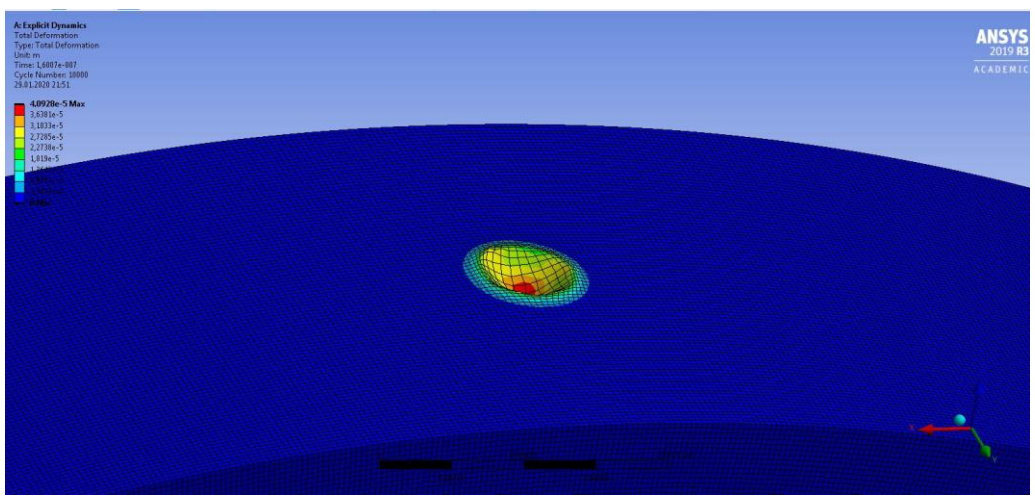
Пружна деформація

$$h_y = \sqrt[1/1,5]{\frac{F_{\text{уср}}}{k_{\text{п}}}}$$

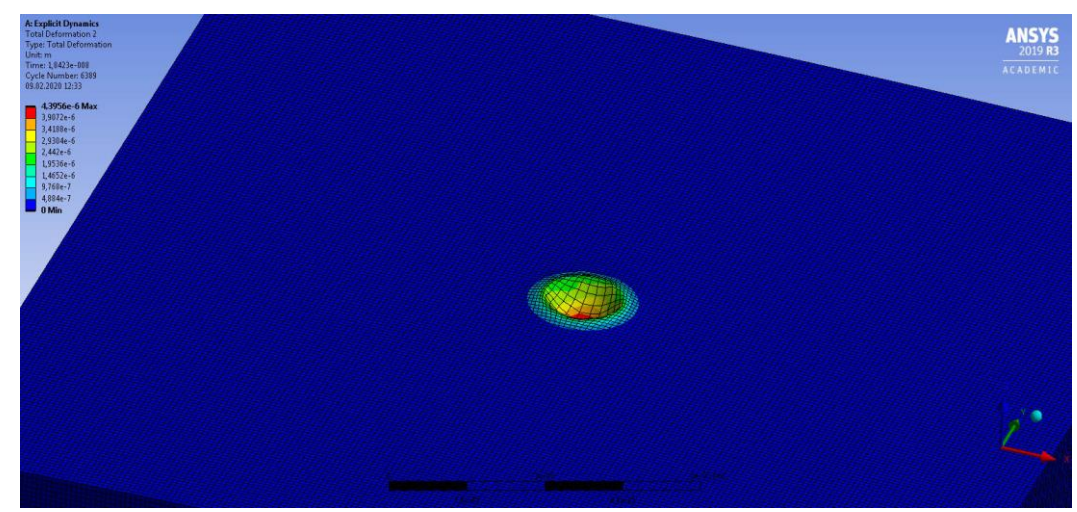
$$k_{\text{п}} = 1,33\sqrt{r}\,\frac{E_1 E_2}{(1-v_1^2)E_2 + (1-v_2^2)E_1}$$

Результати моделювання для 12Х18Н10Т

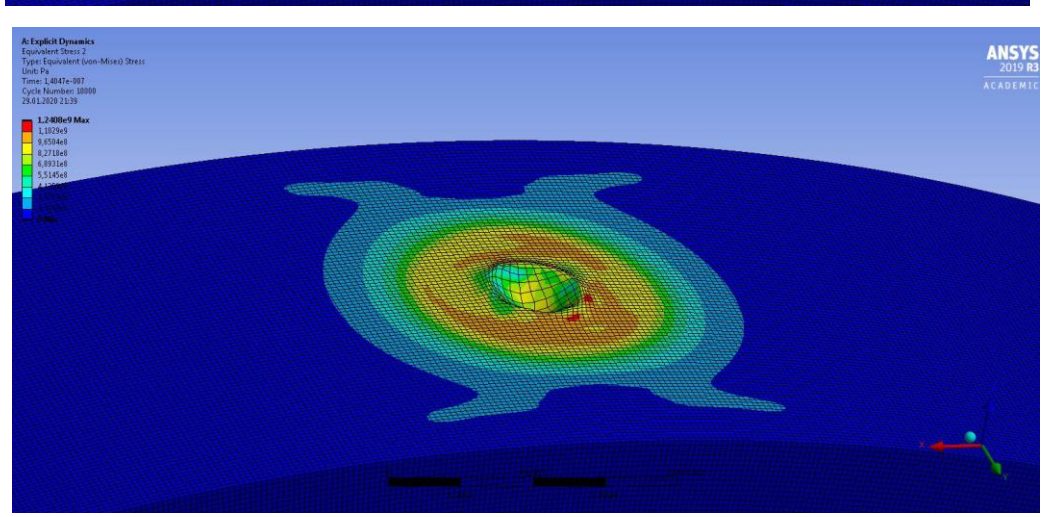
100 мкм



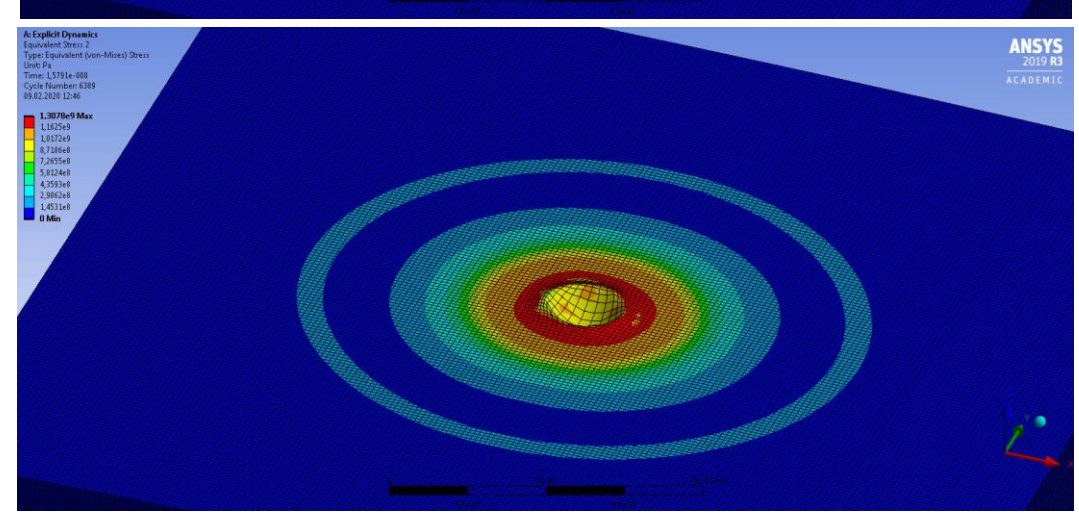
10 мкм



повна деформація

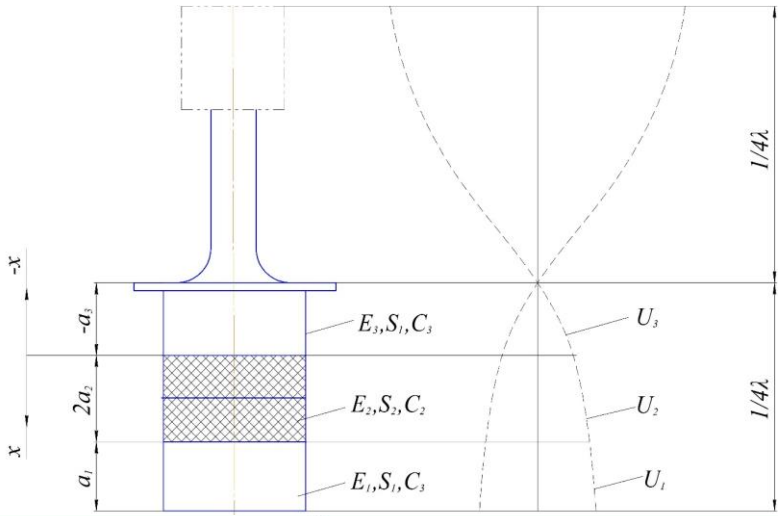


еквівалентне напруження за Мізесом

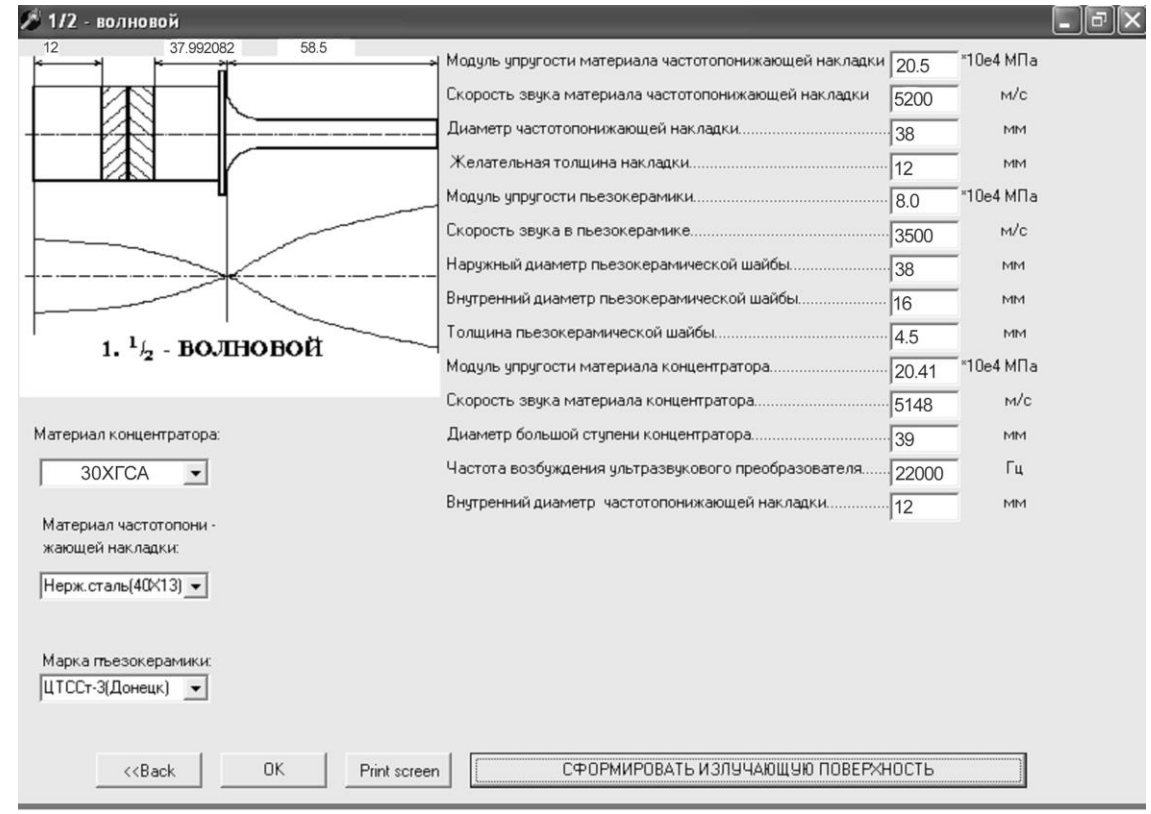


РОЗРАХУНОК УЛЬТРАЗВУКОВОГО ІНСТРУМЕНТУ

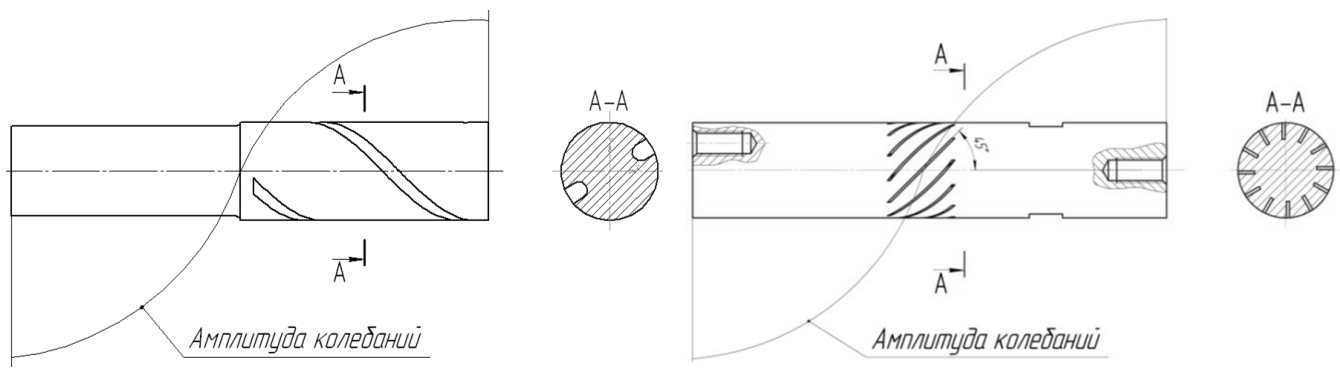
Розрахункова схема ½-хвильового ультразвукового вибраціонного приводу

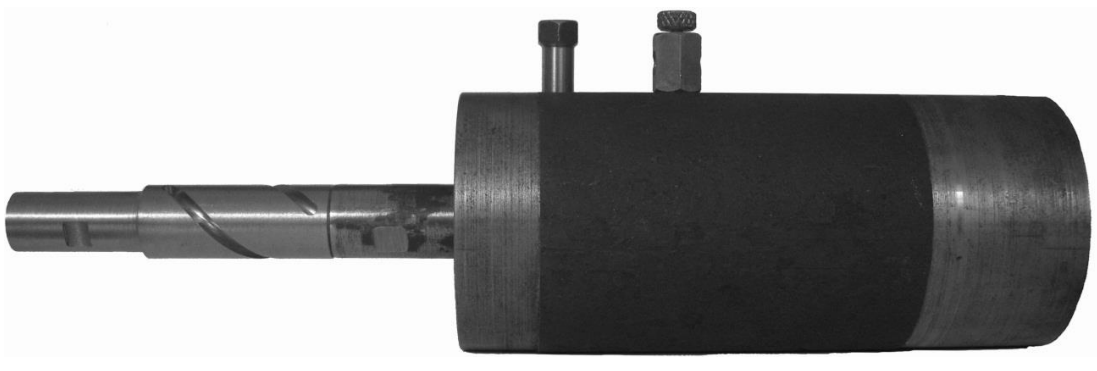


Розрахунок геометричних параметрів ½-хвильового перетворювача

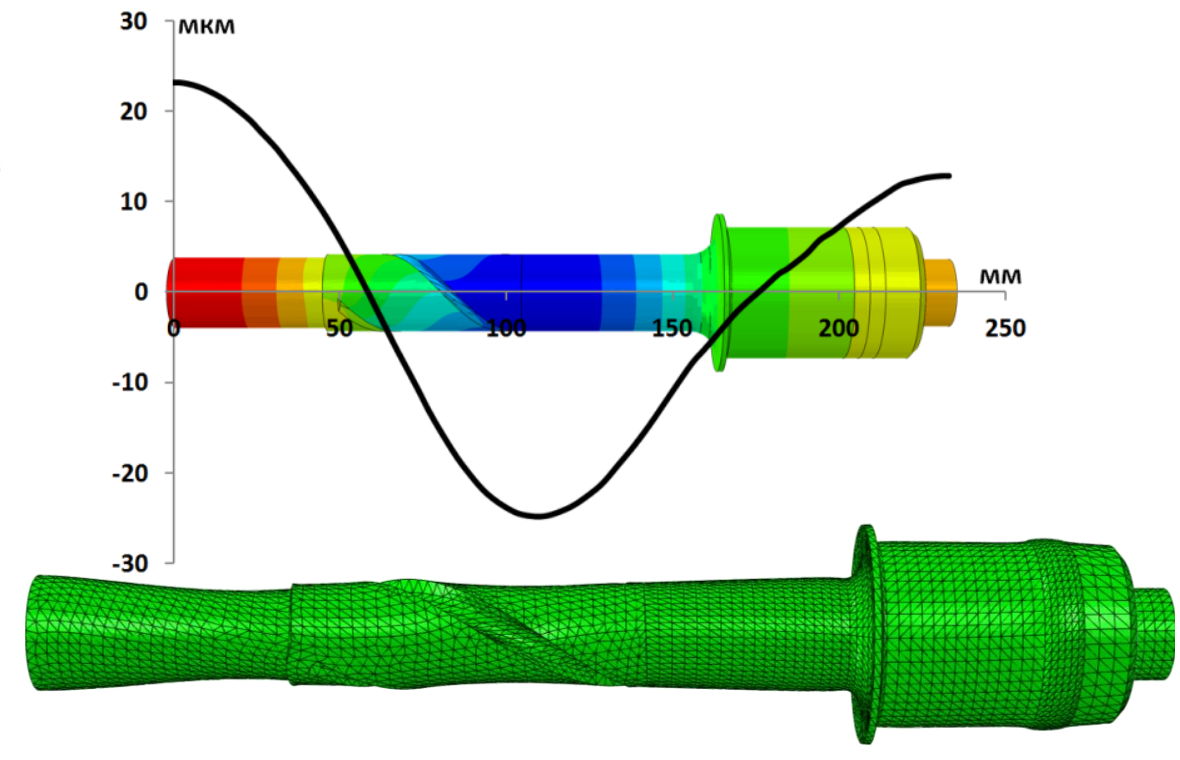


Півхвильові концентратори поздовжньо-крутильних коливань





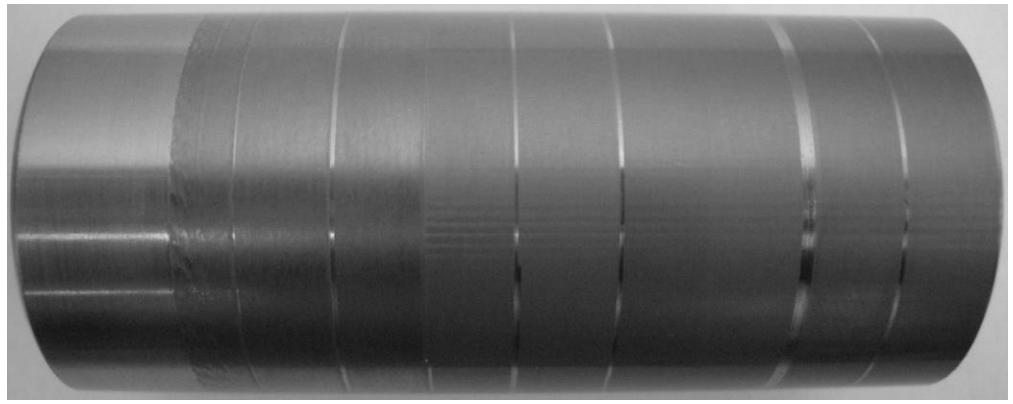
Розподіл амплітуд поздовжніх і крутильних хвиль в хвилеводі



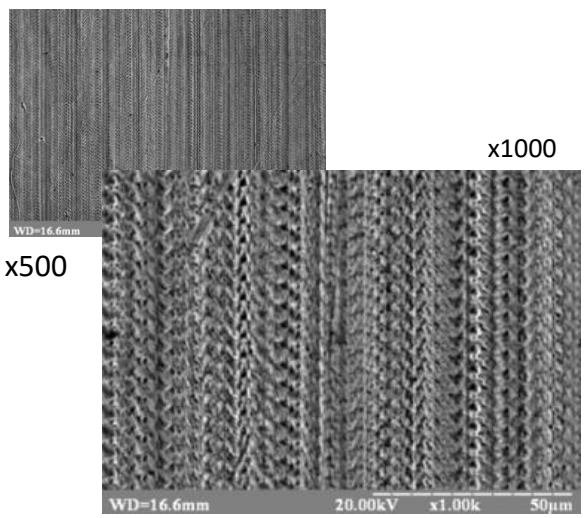
УЗ ВИГЛАДЖУВАННЯ ТИТАНОВИХ СПЛАВІВ (ВТ22 ТА ВТ23)

Фактура поверхні при різній швидкості обробки:

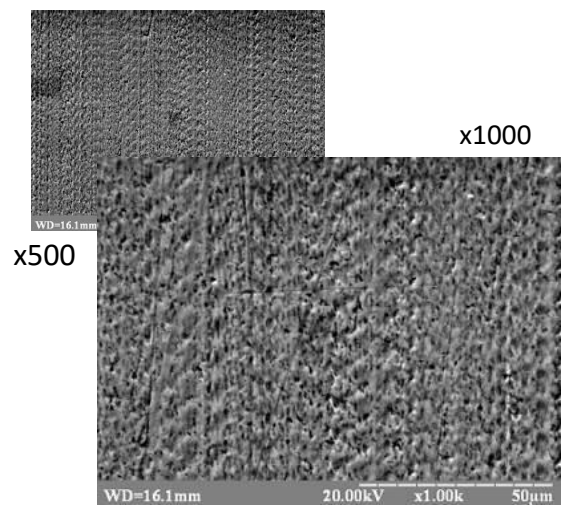
матеріал вигладжувача - ВК8, АКТМ; радіус вигладжувача - 3 мм; частота коливань - 22 кГц



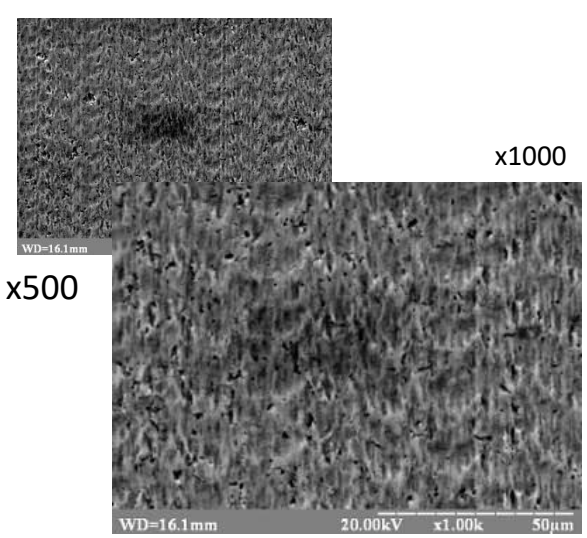
V=4.3 м/хв



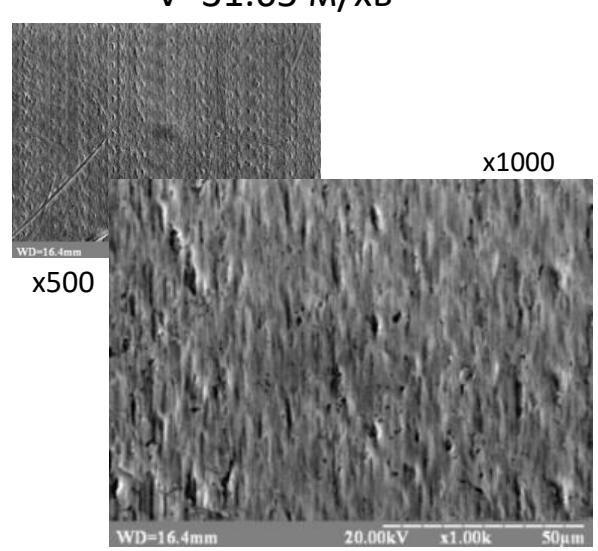
V=11 м/хв



V=21.76 м/хв

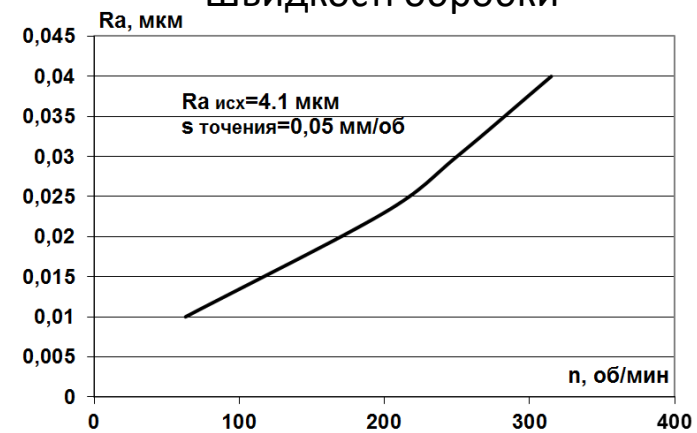


V=31.65 м/хв

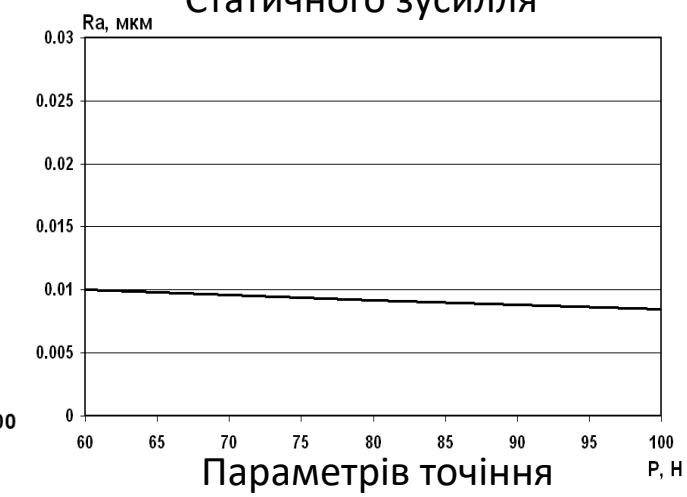


Залежність шорсткості поверхні деталі в залежності від параметрів процесу

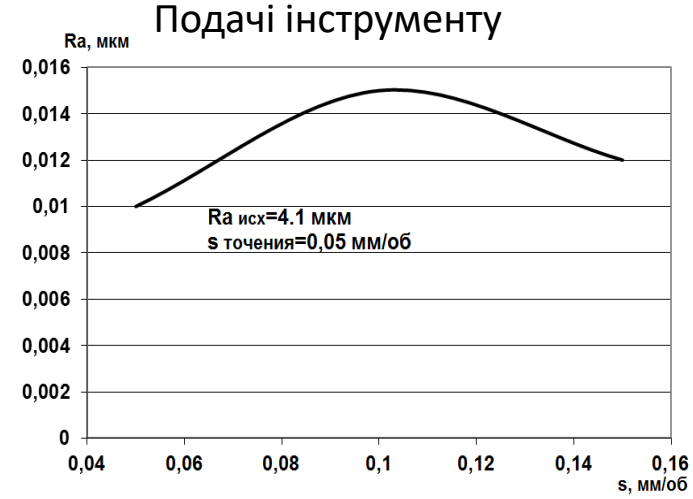
Швидкості обробки



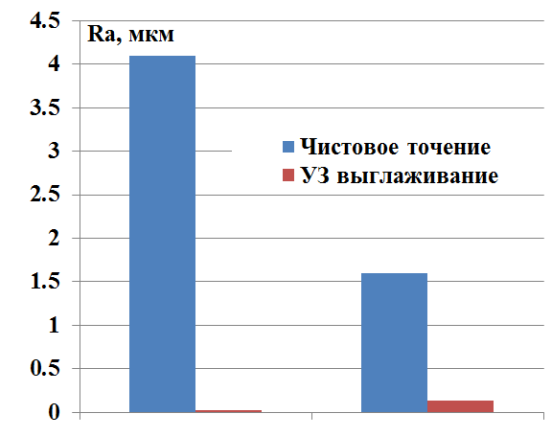
Статичного зусилля



Подачі інструменту

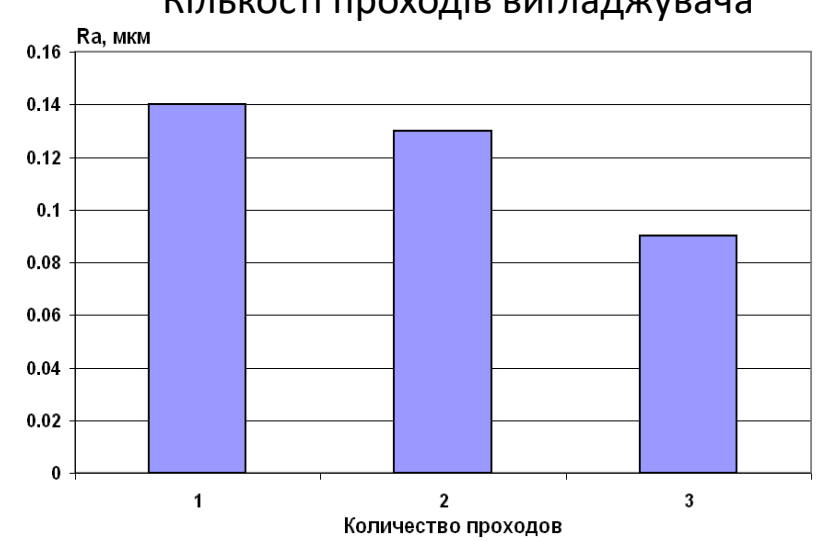


Параметрів точіння



Подача різця:
1-s=0,05 мм/об
2-s=0,15 мм/об

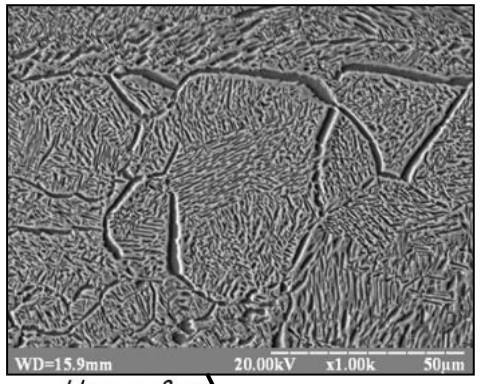
Кількості проходів вигладжувача



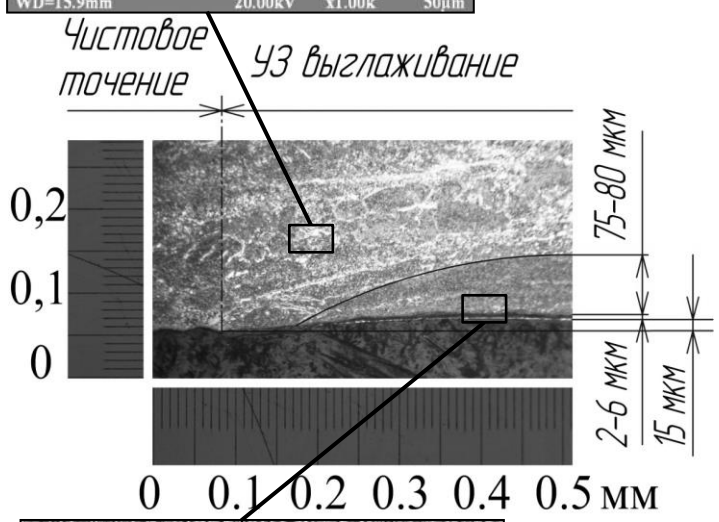
УЗ ВИГЛАДЖУВАННЯ ТИТАНОВИХ СПЛАВІВ (ВТ22 ТА ВТ23)

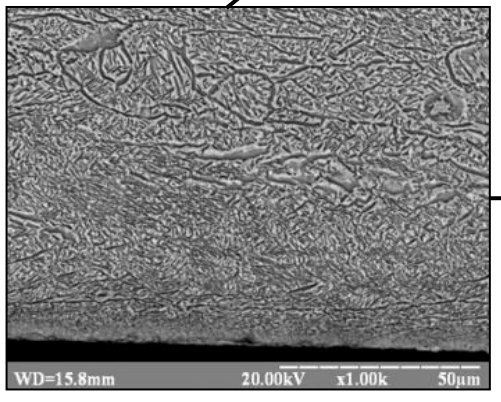
Мікроструктура поверхневого шару

Вихідна структура



x1000

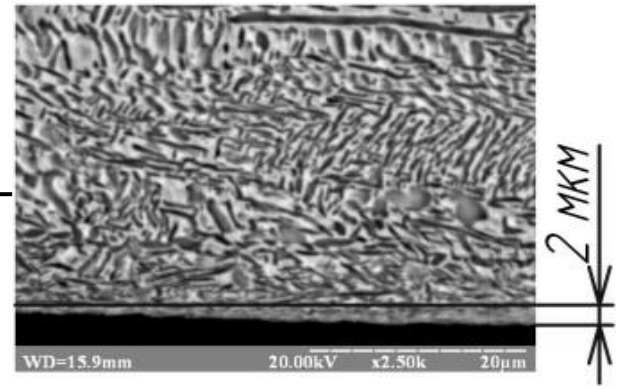




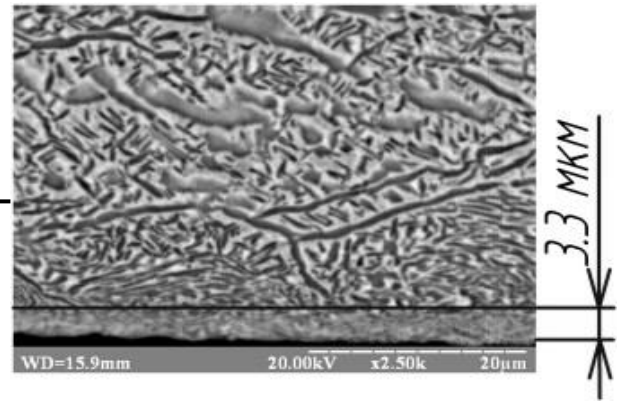
x1000

Структура після зміцнення

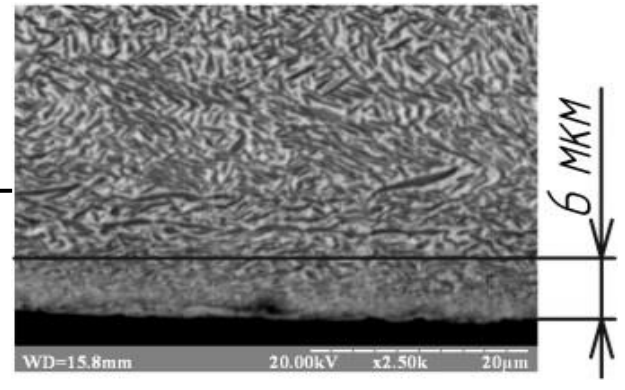
V=4.4 м/хв



V=11 м/хв



V=21.76 м/хв

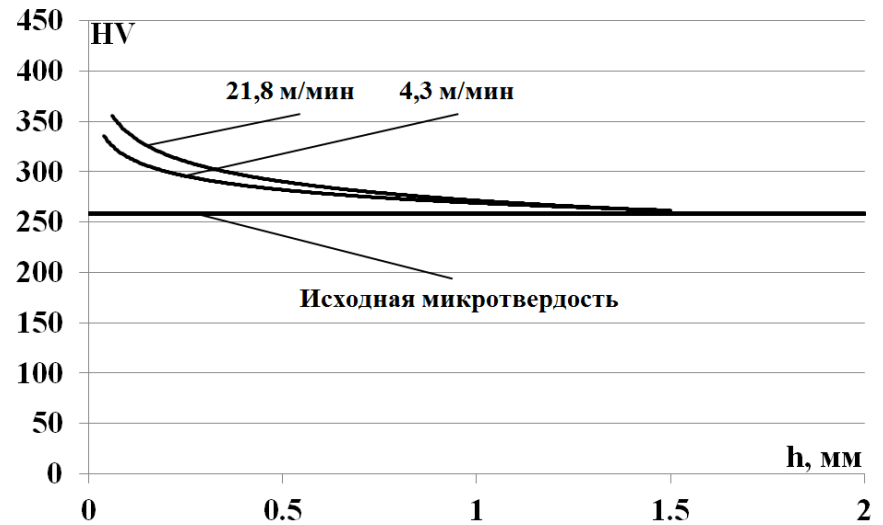


x2500

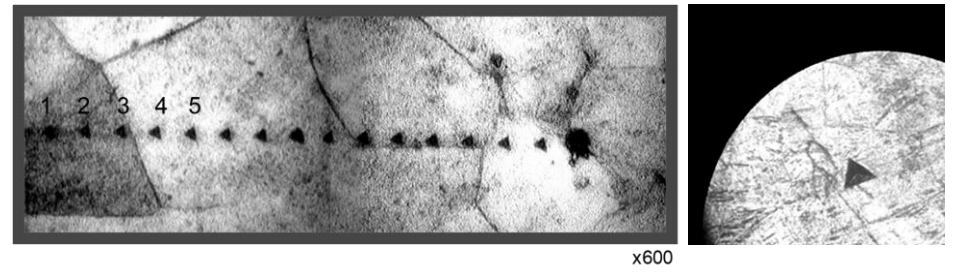
При УЗ вигладжуванні відбувається значне подрібнення зерен на глибину до 100 мкм, максимум подрібнення структури, спостерігається у поверхні зразка на глибині 2-6 мкм. Обробка УЗ вигладжуванням дозволяє збільшити мікротвердість в приповерхневому шарі в 1,5-2,0 рази.

Мікротвердість поверхневого шару

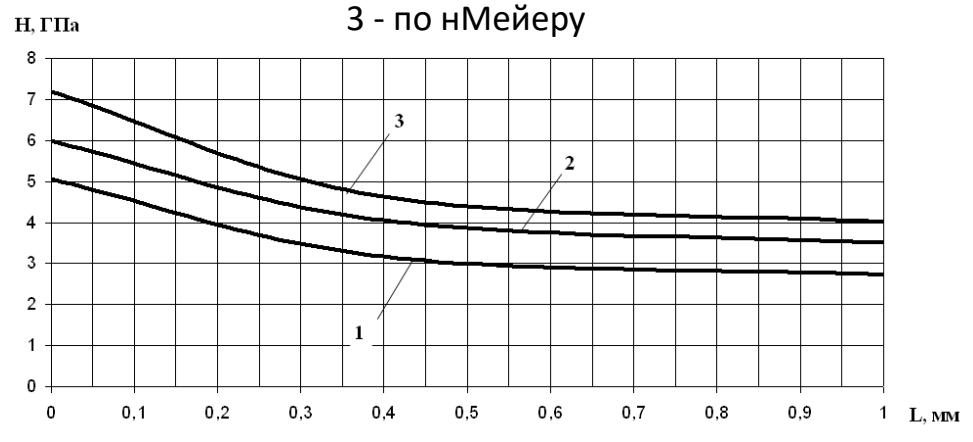
Мікротвердість поверхневого шару ВТ23 в залежності від швидкості обробки при УЗ вигладжуванні



Серія з 15 послідовних вдавлень і збільшений відбиток від вдавлення індентора Бекровича

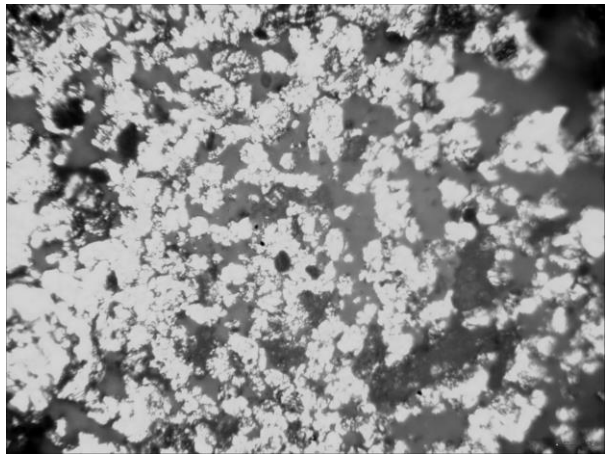


Результати вимірів мікротвердості поверхневого шару після УЗ вигладжування: 1 - по Мейеру, 2 - по Мартелу; 3 - по нМейеру

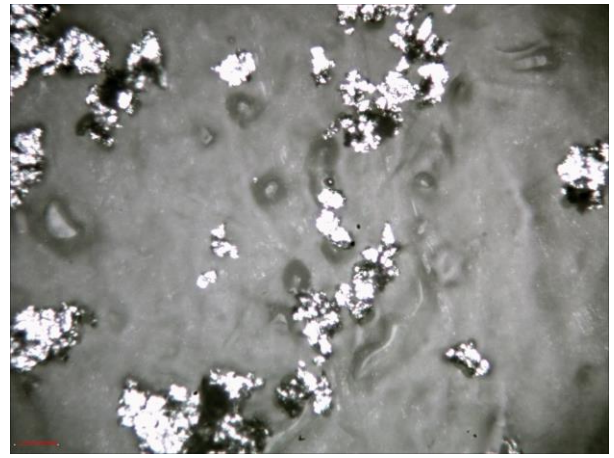


УЗ ВИГЛАДЖУВАННЯ ТИТАНОВИХ СПЛАВІВ (ВТ22, ВТ23) З МЕТАЛОМІСТКОСТІ МАСТИЛОМ

Cu

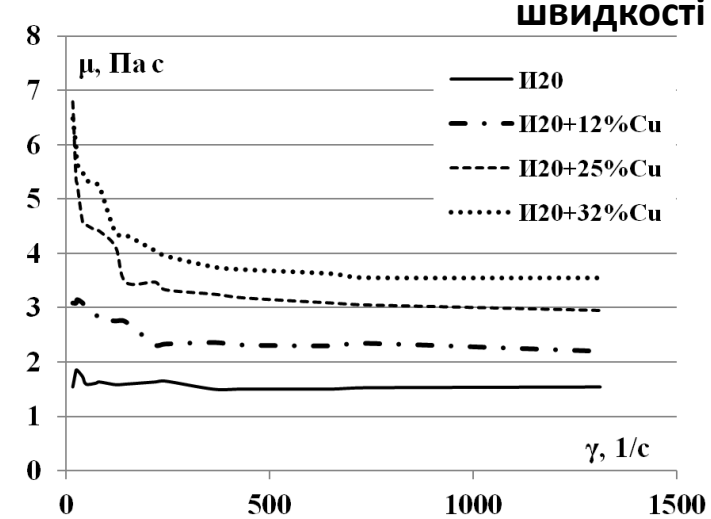


Al



Средний размер частиц – 10 мкм

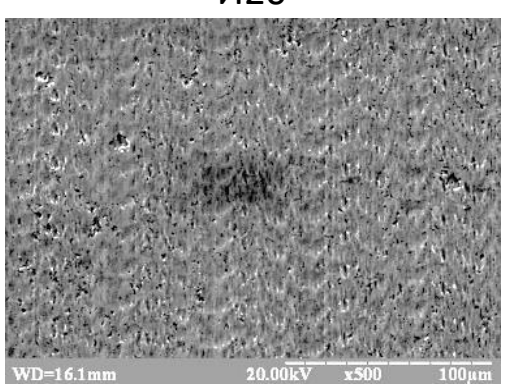
Динамічна в’язкість μ мастила в залежності від градієнта швидкості



При додаванні мікропорошків металів в мастило И20, збільшується в'язкість мастила, мастило стає псевдопластичною рідиною, в'язкість якої залежить від швидкості зсуву в шарі мастила.

Мікрорельєф поверхні і її хімічний склад при швидкості обробки V=21.8 м/хв залежно від мастила

И20

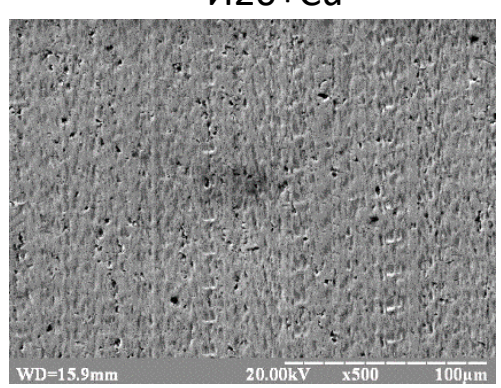


Информация

Напряжение (кВ): 20.00
Сумма %: 100.00

Элемент	Инт.	С %
Al K	187	0.58
S K	416	1.05
Ti K	22059	97.42
Ti L	14	0.00
Cr K	63	0.50
Cr L	15	0.00
Fe K	50	0.45
Fe L	7	0.00

И20+Cu

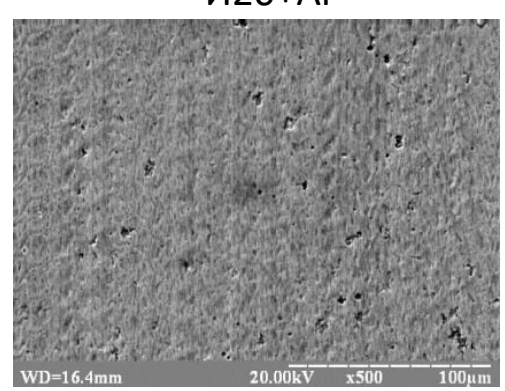


Информация

Напряжение (кВ): 20.00
Сумма %: 100.00

Элемент	Инт.	С %
Al K	175	0.60
Ti K	21323	93.84
Ti L	11	0.00
Cr K	75	0.58
Cr L	19	0.00
Fe K	25	0.22
Fe L	15	0.00
Cu K	206	2.88
Cu L	5	0.00
Mo L	313	1.88
Mo M	15	0.00

И20+Al



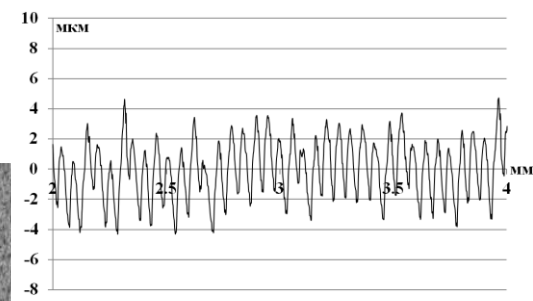
Информация

Напряжение (кВ): 20.00
Сумма %: 100.00

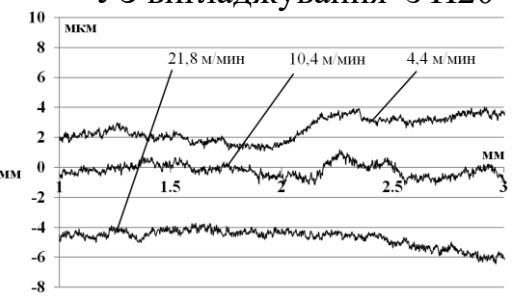
Элемент	Инт.	С %
Al K	265	0.99
Ti K	20194	96.16
Ti L	10	0.00
Cr K	83	0.70
Cr L	19	0.00
Fe K	9	0.09
Fe L	14	0.00
Cu K	-15	0.00
Cu L	5	0.00
Mo L	313	2.06
Mo M	15	0.00

Шорсткість поверхні зразків

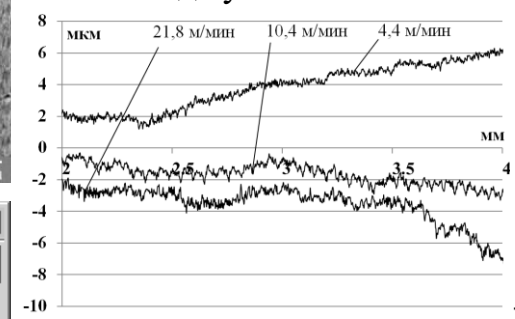
Чистове точіння



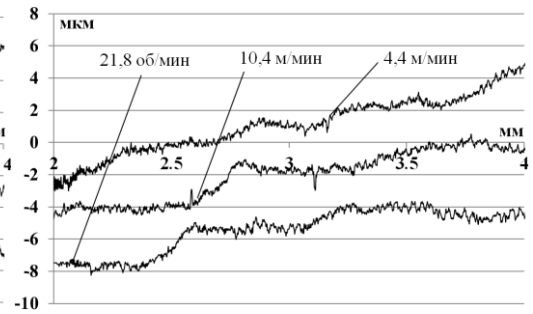
УЗ вигладжування з И20



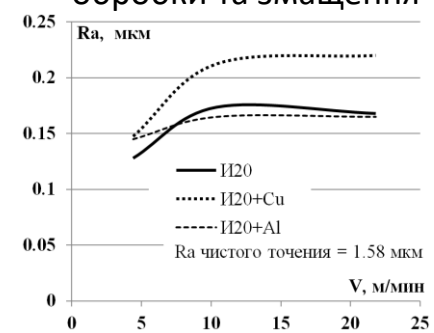
УЗ вигладжування з И20+Cu



УЗ вигладжування з И20+Al

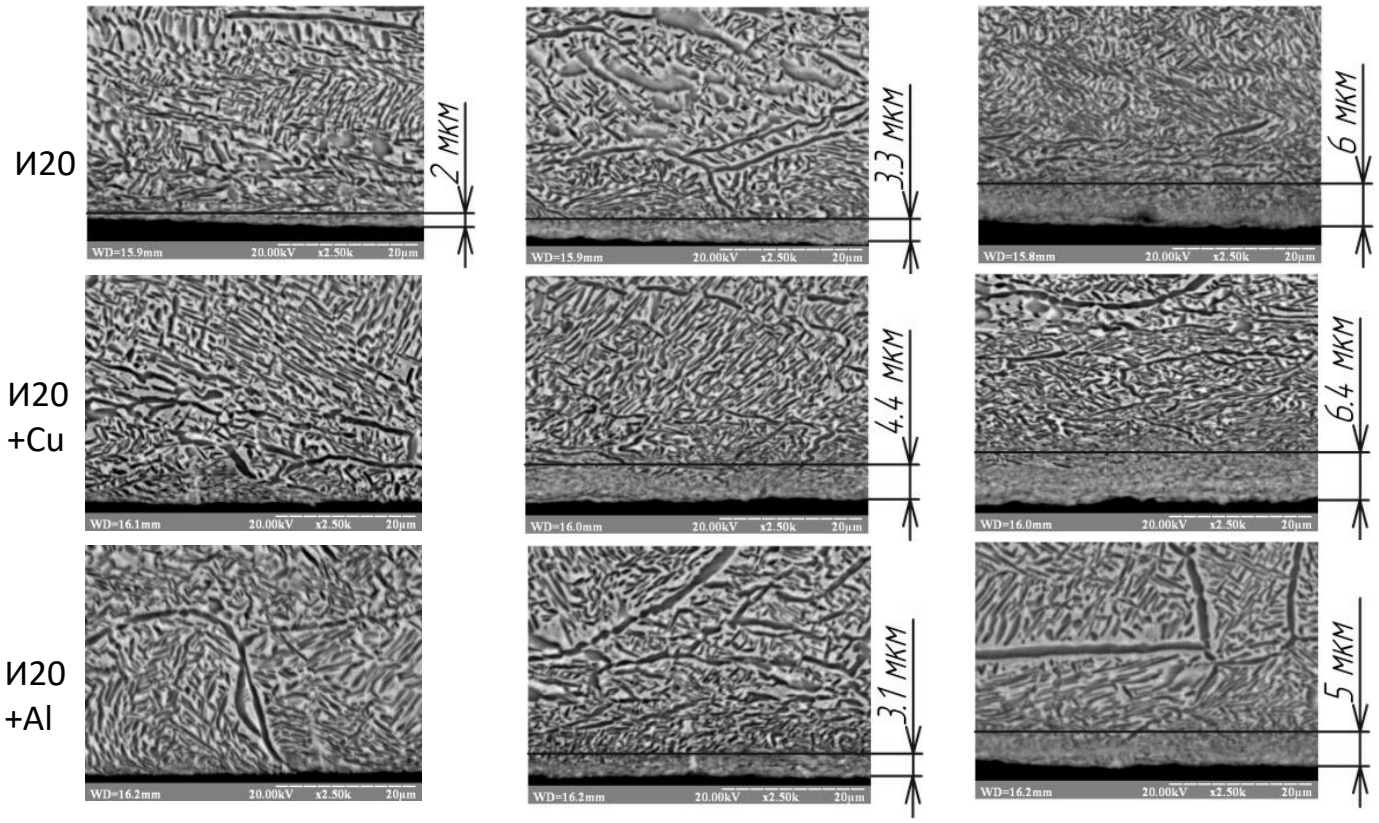


Шорсткість поверхонь в залежності від швидкості обробки та змащення

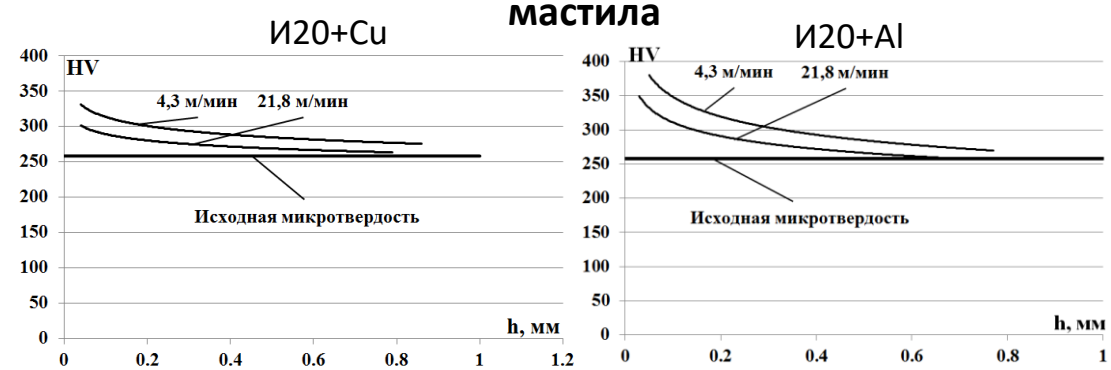


МІКРОСТРУКТУРА ПОВЕРХНЕВОГО ШАРУ (ВТ22, ВТ23) В ЗАЛЕЖНОСТІ ВІД ШВИДКОСТІ ОБРОБКИ ТА ЗМАЩЕННЯ

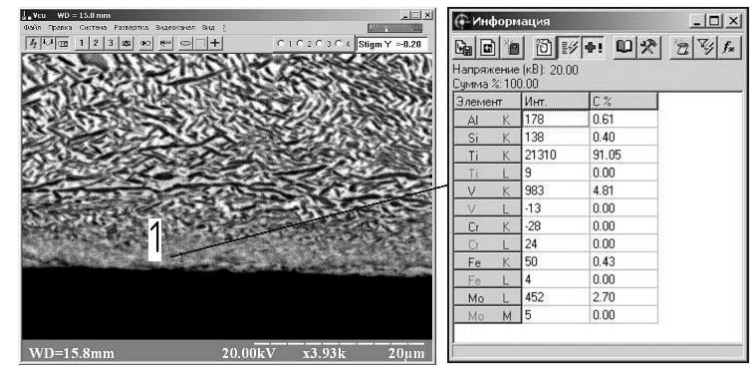
4.4 м/хв | 10.4 м/хв | 21.8 м/хв



Мікротвердість поверхневого шару в залежності від мастила

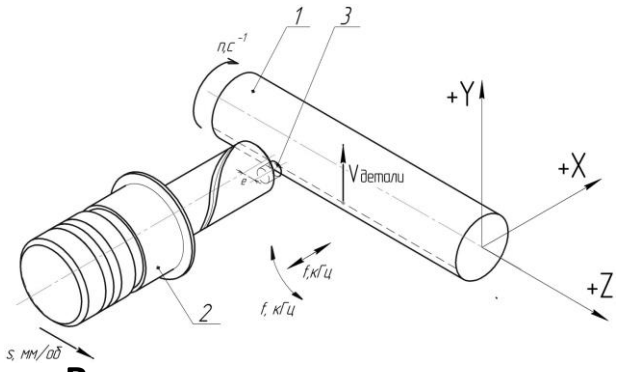


Хімічний склад приповерхневого шару при швидкості обробки V=21.8 м/хв в при мастилі И20 + Al

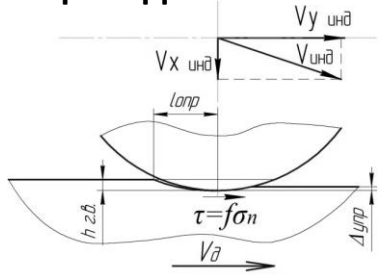


УЗ ВИГЛАДЖУВАННЯ ТИТАНОВИХ СПЛАВІВ (ВТ22, ВТ23) ПРИ ПОЗДОВЖНЬО-КРУТИЛЬНИХ КОЛИВАНЬ

Розташування виглажувача відносно осі деталі

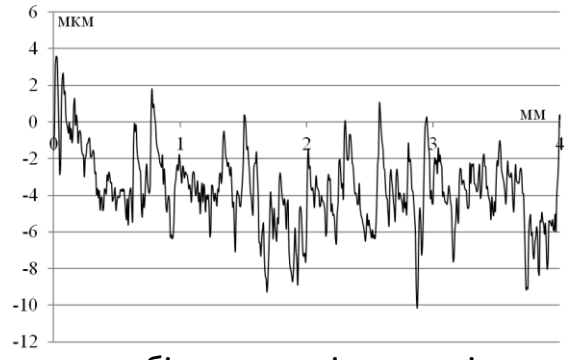


Вдавлюваня вигладжувача в поверхню деталі при збігу напрямків переміщень деталі та вигладжувача

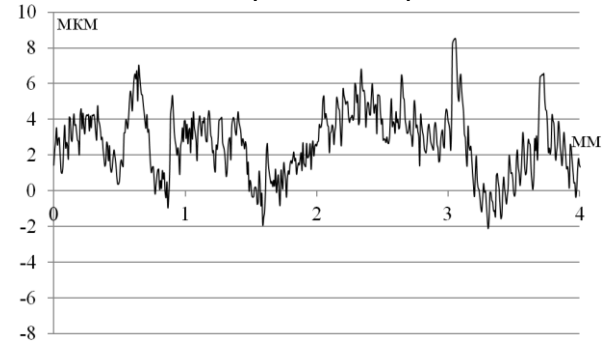


Профілограми поверхонь при швидкості 32 м/хв

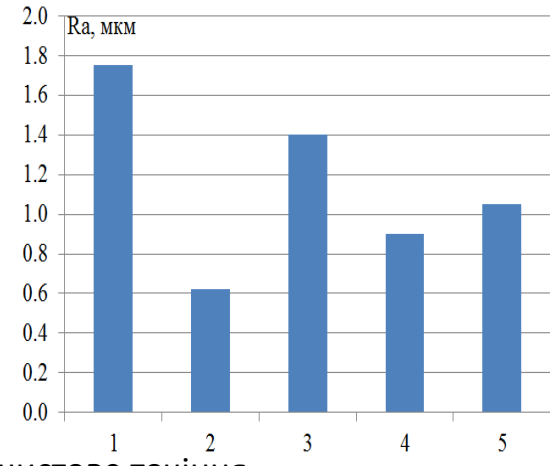
розбіжність напрямків переміщень



збіг напрямків переміщень



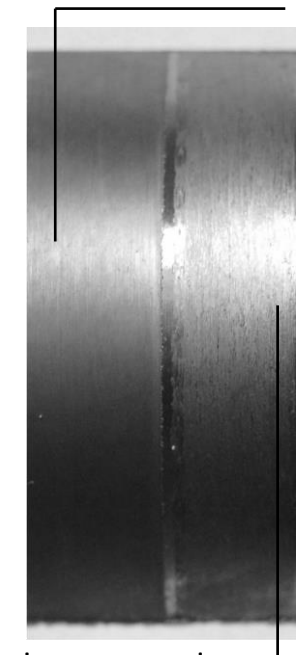
Шорсткість поверхонь



1 – чистове точіння
2 – розбіжність век. шв. при V=6,3 м/хв
3 – розбіжність век. шв. V=31,65 м/хв
4 - збіг век. шв. при V=6,3 м/хв
5 - збіг век. шв. при V=31,65 м/хв

Поверхні при швидкості обробки V=31.65 м/хв

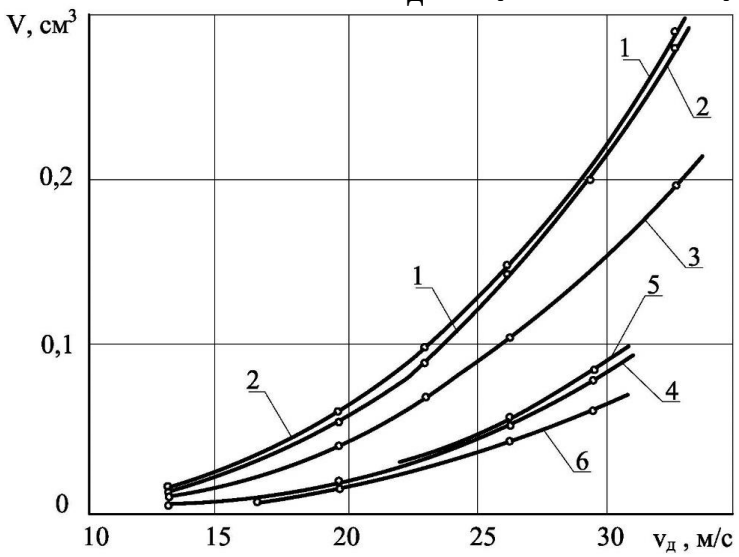
збіг напрямків переміщень



розбіжність напрямків переміщень

ОБРОБКИ ДИСКІВ КОМПРЕСОРА В ПСЕВДОЗРІДЖЕНОМУ ШАРІ АБРАЗИВУ

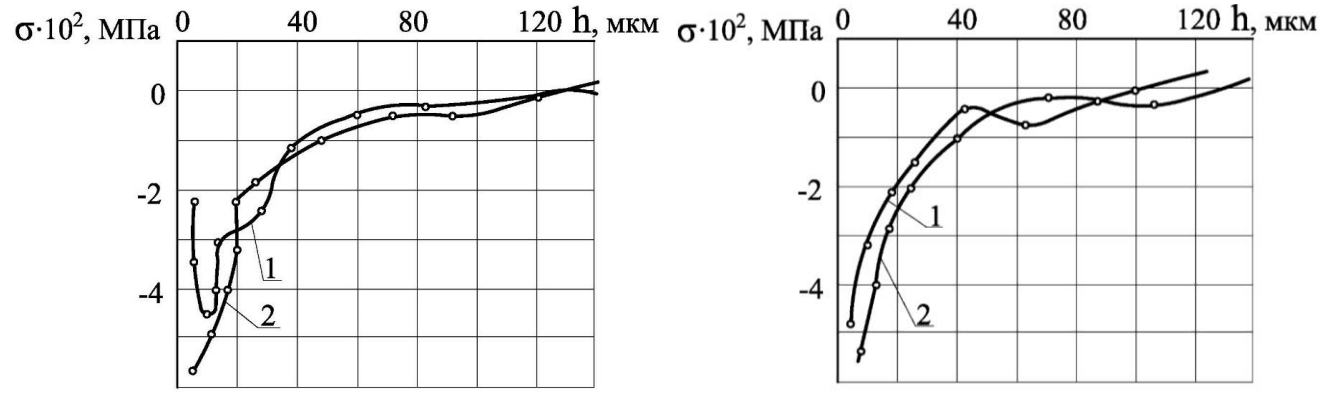
Залежність об'ємного знімання V різних матеріалів від швидкості $v_д$ і зернистості абразиву d3



	матеріал	шліфзерно
1 -	ВТ3-1;	24А80;
2 -	ВТ9;	24А80;
3 -	ЭИ698-ВД;	24А80;
4 -	ВТ3-1;	24А40;
5 -	ВТ9;	24А40;
6 -	ЭИ698-ВД	24А40

Якість поверхневого шару після обробки в псевдозріджувальному шарі абразиву

Залишкові напруження в поверхневому шарі полотна диска із сплаву ВТ9 після обробки абразивним зерном 63С №20 (а) та 24А №16 (б) (1) і після ручного полірування (2)

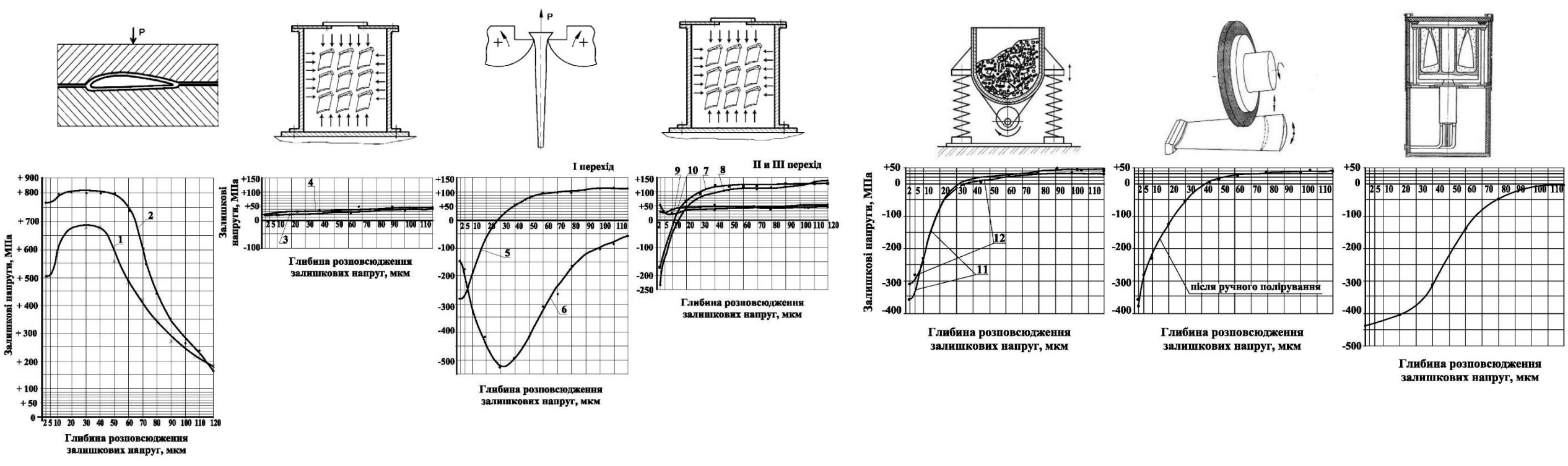


ЗАКОНОМІРНОСТІ ФОРМУВАННЯ ЗАЛИШКОВИХ НАПРУЖЕНЬ У ПОВЕРХНЕВОМУ ШАРІ ПЕРА ЛОПАТОК ТЕХНОЛОГІЧНИМИ МЕТОДАМИ З УРАХУВАННЯМ ТЕХНОЛОГІЧНОЇ СПАДКОВОСТІ

Технологічна схема формоутворення пера робочої лопатки компресора

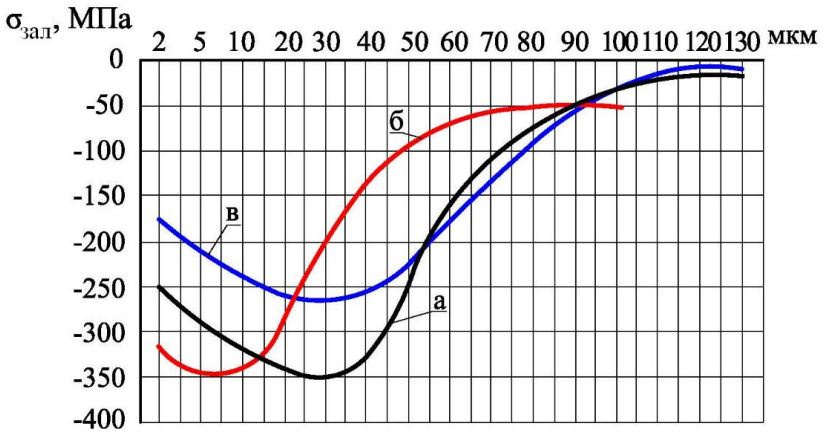
Отделочно-зміцнювальна обробка поверхонь пера робочих лопаток компресора

штампування + калібрування → загартування → вальцювання за 3 переходи → низькотемпературний відпал → віброполірування → ручна доводка → УЗЗ



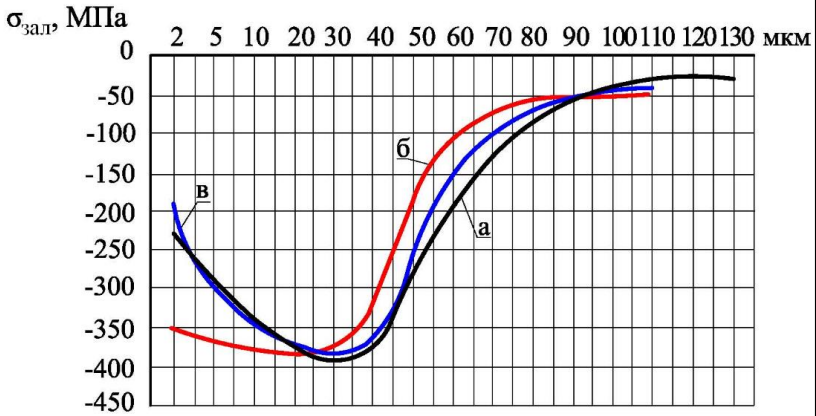
ЗАКОНОМІРНОСТІ РЕЛАКСАЦІЯ ЗАЛИШКОВИХ НАПРУЖЕНЬ У ПОВЕРХНЕВОМУ ШАРІ ТОНКОСТІННИХ ДЕТАЛЕЙ ЗАЛЕЖНО ВІД ЇХНЬОЇ ТЕМПЕРАТУРНОЇ ЕКСПОЗИЦІЇ

Розподіл залишкових напружень у поверхневому шарі післяУЗЗ –5 хв і термоекспозиції при температурі 240 °С



а – після УЗЗ – 5 хв (вихідна);
б – після термоекспозиції t = 240 °С, 2 год.;
в – після термоекспозиції t = 240 °С, 6 год.

Розподіл залишкових напружень у поверхневому шарі після УЗЗ –15 хв і термоекспозиції при температурі 240 °С



а – після УЗЗ – 15 хв (вихідна);
б – після термоекспозиції t = 240 °С, 2 год.;
в – після термоекспозиції t = 240 °С, 6 год.

ВПЛИВ ПОВЕРХНЕВОГО ЗМІЦНЕННЯ УЗ ВИГЛАДЖУВАННЯМ НА МЕЖУ ВИТРИВАЛОСТІ ТИТАНОВИХ СПЛАВІВ (ВТ23)

Зразки до і після випробувань

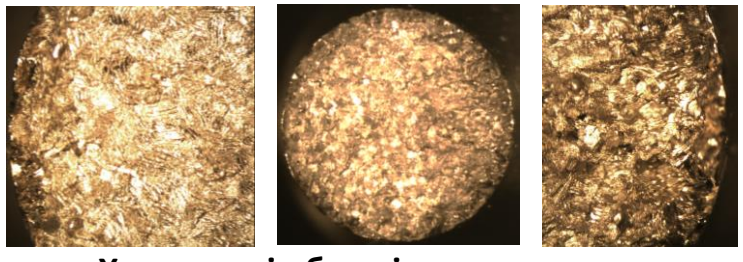
Межа витривалості незміцненого матеріалу

$$\sigma_{-1} = 300 - 310\text{МПа}$$

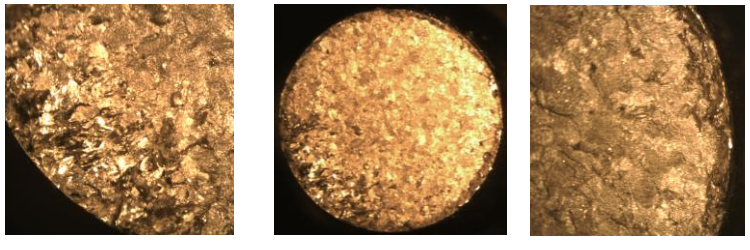
Коефіцієнт зміцнення

$$\beta_з = \frac{\sigma_{-1у}}{\sigma_{-1}}$$

Характерні області втомного зламу зразка до ППД



Характерні області втомного зламу зразка після ППД



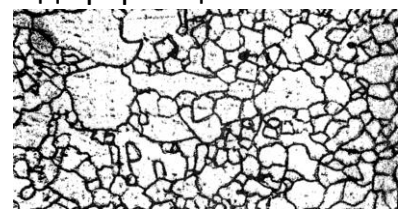
Оцінка коефіцієнта зміцнення для сплаву

P, H	Дополнительное нагружение	V, м/с	$V_{уз}$, м/с	Смазка	σ_{-1}, МПа	$\beta_з$
50	-	0,9	-	И20	370-380	1,15-1,21
50	Ультразвук	0,9	5,5	И20	400-410	1,28-1,33
50	Ультразвук	0,9	5,5	И20+Al	420-440	1,39-1,45

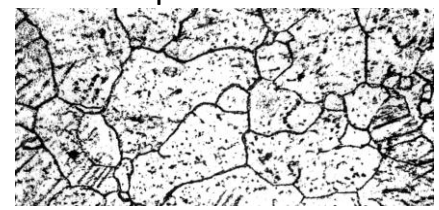
ВПЛИВ ХОЛОДНОГО ДЕФОРМУВАННЯ І ТЕРМІЧНОЇ ОБРОБКИ ЖАРОМІЦНОГО СПЛАВУ НА ЕКСПЛУАТАЦІЙНІ ВЛАСТИВОСТІ ЛОПАТОК КОМПРЕСОРА ГТД (ХН77ТЮРВД)

Мікроструктура смуги у вихідному стані

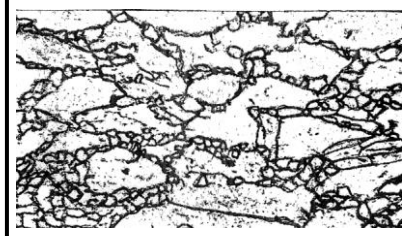
нагрів перед деформацією 1130 °С



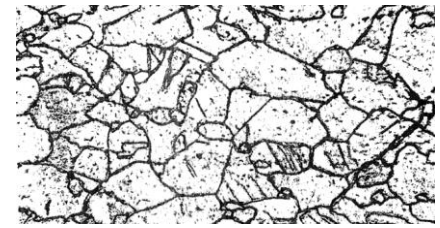
після загартування-режим 1



перед вальцюванням після загартування, режим 5



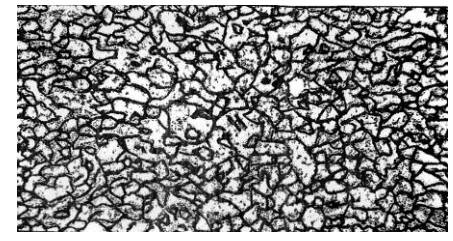
перед вальцюванням після загартування, режим 3



після холодного вальцювання і наступної термообробки

режим 1

режим 2

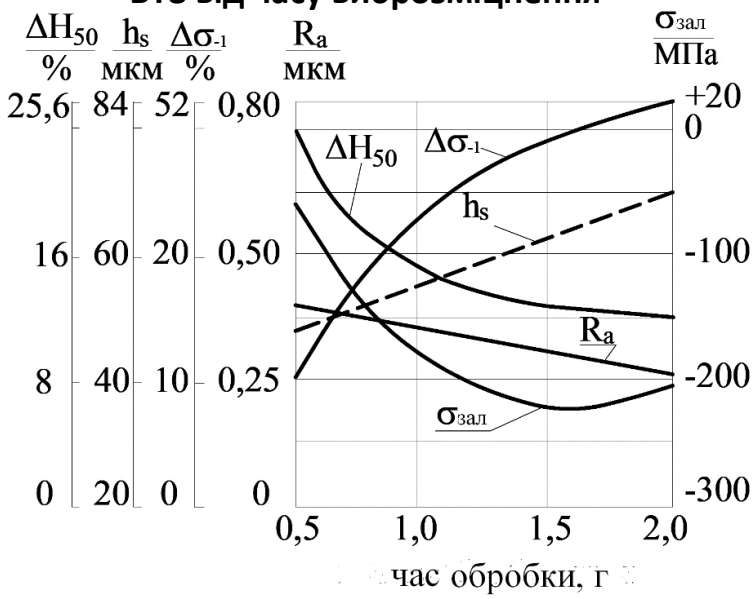


Режими термічної обробки зразків

№ режиму	Режим термообробки			
	Загартування		Старіння	
	Темп, °С	Час, година	Температура, °С	Час, година
1	1080	8	700	16
2		2		
3		1		
4		2	800 700	4 16
5	1000	4	750	16

ВПЛИВ ТЕХНОЛОГІЧНОЇ СПАДКОВОСТІ ВАРІАНТІВ ТЕХНОЛОГІЇ ВИГОТОВЛЕННЯ РОБОЧИХ ЛОПАТОК КОМПРЕСОРА НА ПІДВИЩЕННЯ ГРАНИЦІ ВИТРИВАЛОСТІ

Залежності параметрів якості поверхневого шару і границі витривалості лопаток зі сплаву ВТ8 від часу виброзміцнення

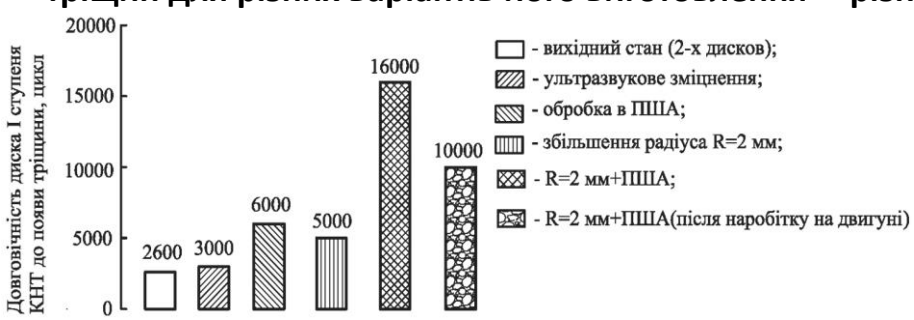


Підвищення границі витривалості робочих лопаток КНТ із титанового сплаву ВТ8 (а) і коефіцієнта підвищення границі витривалості (б) після УЗЗ

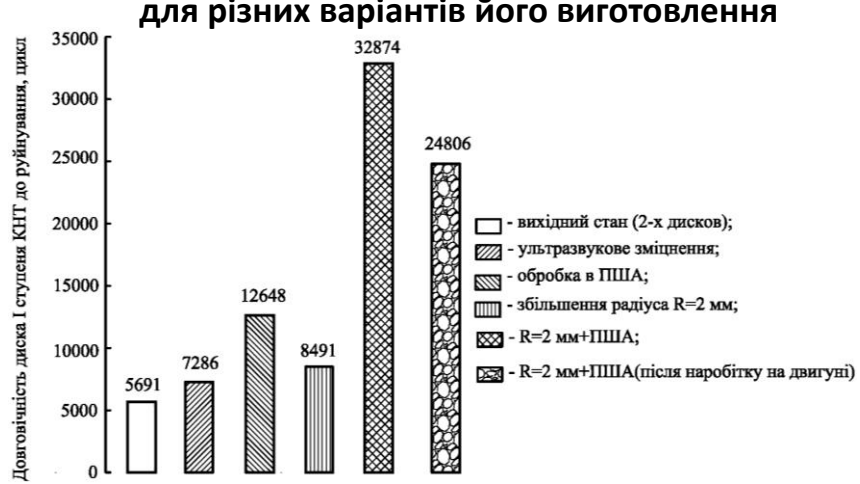
Підвищення границі витривалості робочих лопаток з жароміцного сплаву ЭИ437Б-ВД (а) і коефіцієнта підвищення границі витривалості (б) після УЗЗ

ВПЛИВ ОБРОБКИ ДИСКІВ РОТОРІВ КОМПРЕСОРІВ ГТД (Д-36) ІЗ ТИТАНОВИХ СПЛАВУ ВТ3-1 У ПСЕВДОЗРІДЖЕНОМУ ШАРІ АБРАЗИВУ (ПША) НА ДОВГОВІЧНІСТЬ

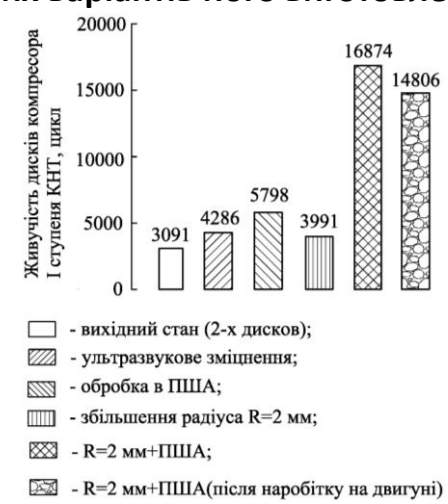
Довговічність диска I ступеня КНТ до появи тріщин для різних варіантів його виготовлення

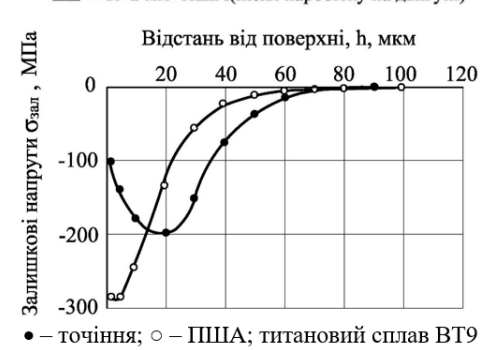


Довговічність диска I ступеня КНТ до руйнування для різних варіантів його виготовлення



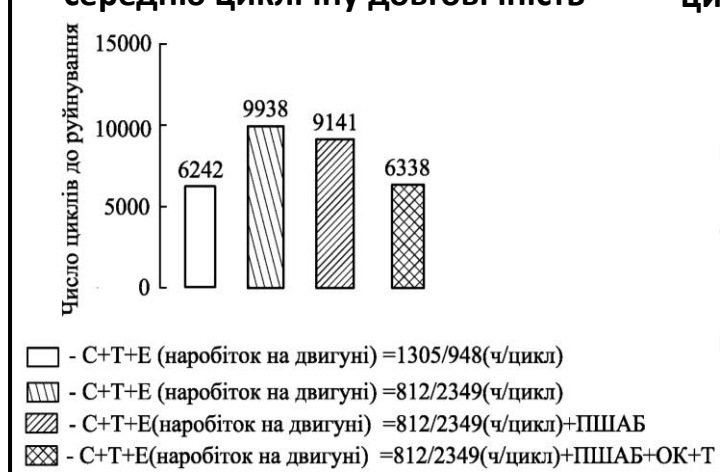
Живучість дисків I ступеня КНТ для різних варіантів його виготовлення



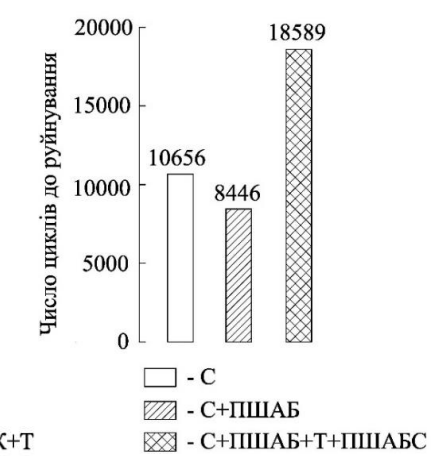


ПІДВИЩЕННЯ ДОВГОВІЧНОСТІ ЗВАРНИХ БАРАБАНІВ РОТОРІВ (ВТ9) КОМПРЕСОРІВ ДВИГУНА Д-36 ОБРОБКОЮ В ПСЕВДОЗРІДЖЕНОМУ ШАРІ АБРАЗИВУ

Вплив варіантів обробки диска IV ступеня КВТ у складі барабана після наробітки в експлуатації на середню циклічну довговічність



Вплив обробки диска IV ступеня КВТ у складі барабана на середню циклічну довговічність



С – серійна обробка диска – точіння + протяжка й закруглення кромок абразивними стрічками; ПШАБ – обробка методом ПША в складі барабана, без застосування повітряних сопів; Т – відпал при Т= 750°С; ПШАБС – обробка методом ПША в складі барабана із застосуванням повітряних сопів; Е - експлуатація в ч/цикл; ОК - зняття окісного шару методом травлення