



Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

Завершена прикладна науково-дослідна робота

Створення ресурсозберігаючих процесів та установки для ізотермічного в'язкопластичного формоутворення з титанових сплавів і порошкових матеріалів деталей з тонкостінними елементами в машинобудуванні

2505п

Науковий керівник – д.т.н., професор Тітов В.А.

Період виконання

Початок – 01.01.2022

Закінчення – 31.12.2023

Обсяг фінансування, тис. грн.

Згідно із запитом – 3000,00 тис. грн

Фактичний –



Мета роботи – створення теоретичних основ процесів та дослідної установки для ізотермічного формоутворення в умовах в'язкопластичного деформування деталей з тонкостінними елементами з титанових сплавів та порошкових матеріалів.

Вирішені задачі:

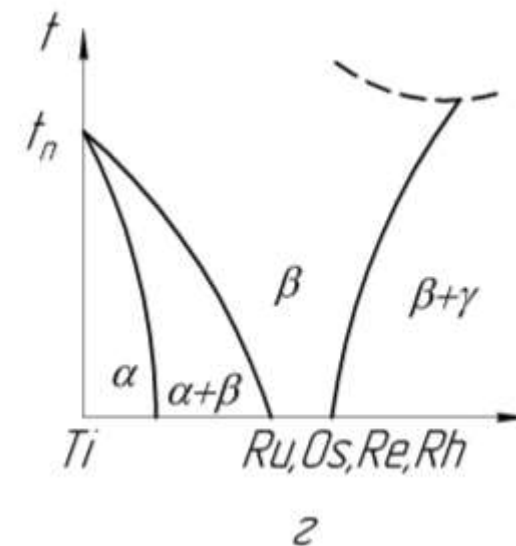
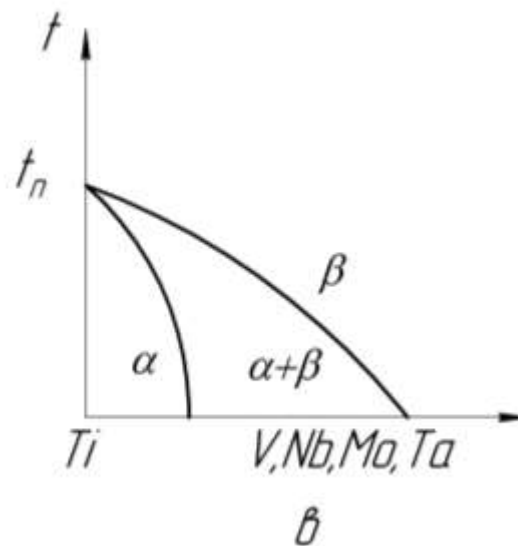
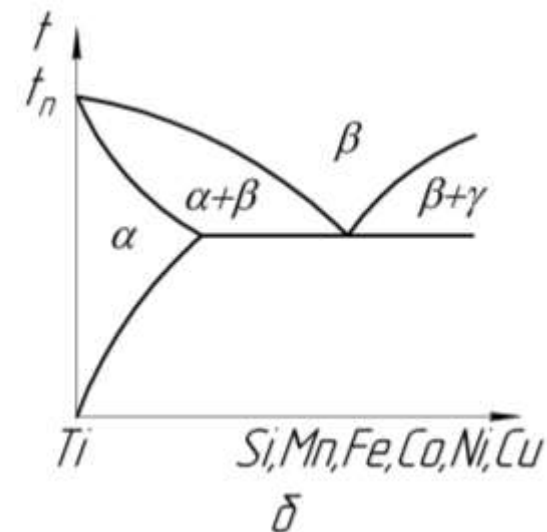
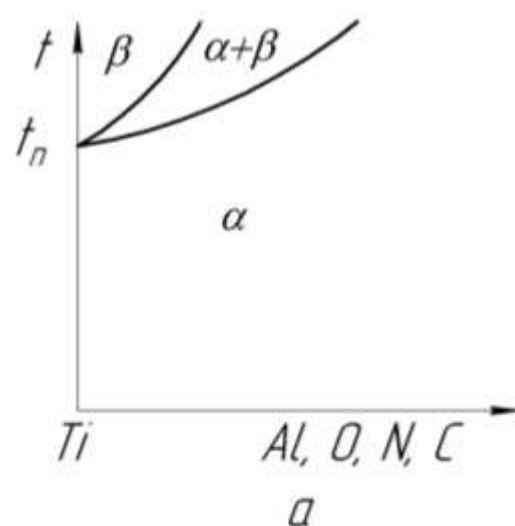
1. Виконана класифікація основних (типових) титанових сплавів, особливостей їх обробки, використання;
2. Проведено аналіз використання деталей з титанових сплавів в конструкціях наукоємного машинобудування – авіаційних газотурбінних двигунах. Вибрано типові деталі-представники з тонкостінними елементами;
3. Розроблено загальний теоретичний метод розрахунку формоутворення тонкостінних елементів деталей на основі теорії пластичної течії з використанням структурно-варіаційного методу В.Л. Рвачова при побудові кінематичних моделей швидкостей переміщень матеріальних точок для суцільних і структурно неоднорідних середовищ;
4. Розроблено та досліджено експериментально-аналітичний метод визначення в'язкопластичної моделі матеріалу при випробуваннях на згин та формоутворення мембрани;
5. Визначено функціональну залежність деформаційних властивостей титанових сплавів і порошкових матеріалів в залежності від температурного, силового факторів процесу, а також структури запропоновано та реалізовано метод обробки на основі великих пластичних деформацій;
6. Виконано чисельне дослідження процесів деформування типових конструкцій деталей в залежності від силового, температурного та швидкісного факторів. Проведена експериментальна оцінка теоретичних результатів;
7. Розроблена установка для експериментальних досліджень в умовах ізотермічного формоутворення на зразках;
8. Проведено аналіз впливу температурного фактора на умови деформування при реалізації ізотермічних процесів чисельними методами розрахунку з використанням в'язкопластичних моделей;
9. На основі отриманих результатів розроблені рекомендації для впровадження процесів.

КЛАСИФІКАЦІЯ ОСНОВНИХ ТИТАНОВИХ СПЛАВІВ

Промислові титанові сплави

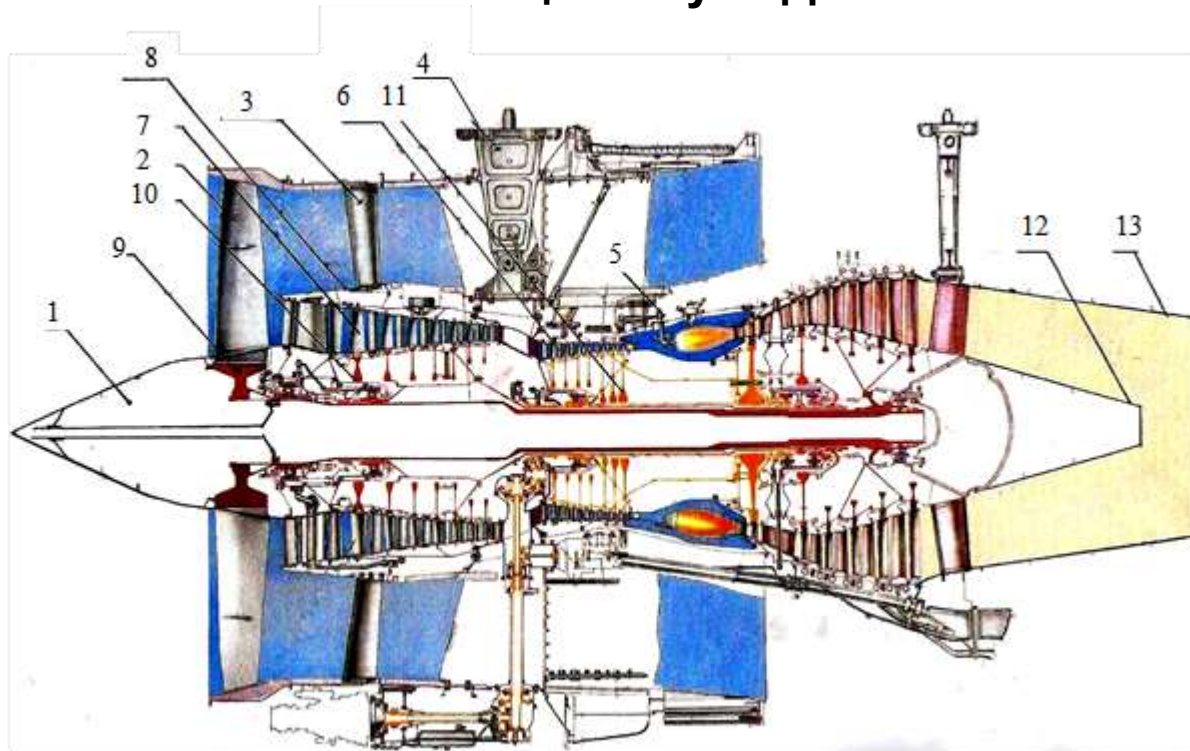
№	Марка сплаву	Середній хімічний склад, % мас	[Al] _{св.} %	[Mo] _{св.} %
α-сплави				
1	BT1-00	0,10 O ₂ ; 0,04N; 0,05 C; 0,08 Si; 0,20 Fe*	0,8	–
2	BT1-0	0,12 O ₂ ; 0,04N; 0,07 C; 0,10 Si; 0,20 Fe*	1,2	–
3	BT5-1	5Al – 2,5Sn	6,8	–
4	GN7V	2,2Al – 2,5Zr	3,6	–
Псевдо-α-сплави				
5	OT4-0	0,8Al – 0,8Mn	1,8	1,3
6	OT4-1	1,5Al – 1Mn	2,5	1,7
7	OT4	4Al – 1,5Mn	5,0	2,5
8	ПТЗВ	4Al – 2V	5,0	1,4
9	OT4-1B	3Al – 2V	4,0	1,4
10	OT4B	4,5Al – 2,5V	5,5	1,8
11	AT3	3Al – 0,7Cr – 0,4Fe – 0,4Si	4,0	2,2
12	AT6	6Al – 0,7Cr – 0,4Fe – 0,4Si	7,0	2,2
13	BT18Y	6,5Al – 4Zr – 2,5Sn – 0,6Mo – 1Nb – 0,15Si	9,0	1,0
14	BT20	6,5Al – 2Zr – 1Mo – 1V	7,8	1,7
(α+β)-сплави				
15	BT6	6,5Al – 4,5V	7,0	3,2
16	BT6c	5Al – 4V	6,0	2,9
17	BT6кг	6Al – 4V	7,0	2,9
18	BT14	5Al – 3Mo – 1,4V	6,0	4,0
19	BT8	6,5Al – 3,3Mo – 0,30Si	7,5	3,3
20	BT8M	6,5Al – 1Sn – 1Zr – 3,3Mo – 0,15Si	7,8	3,3
21	BT9	6,4Al – 1,5Zr – 3,4Mo – 0,25Si	7,7	3,4
22	BT25Y	6,5Al – 1,8Sn – 3,8Zr – 4Mo – 1W – 0,2Si	8,7	4,5
23	BT36	6,2Al – 2Sn – 3,6Zr – 0,7Mo – 5W – 0,15Si	8,5	3,2
24	BT3-1	6,3Al – 2,5Mo – 1,5Cr – 0,5Fe – 0,3Si	7,3	6,3
25	BT23	5,5Al – 2Mo – 4,5V – 1Cr – 0,6Fe	6,5	8,4
26	BT16	3Al – 4,5V – 5Mo	4,0	8,2
Сплави перехідного класу				
27	BT22	5Al – 5Mo – 5V – 1Cr – 1Fe	6,0	12,7
28	BT22I	3Al – 5Mo – 5V – 1Cr – 1Fe	4,0	12,7
29	BT30	11,5Mo – 6Zr – 4,5Sn	3,5	11,5
Сплави перехідного класу				
30	BT35	15V – 3Cr – 3Al – 3Sn – 1Zr – 1Mo	5,2	16,7
31	BT19	5,5Mo – 5,5Cr – 3,5V – 3Al – 1Zr	4,2	17,2
32	BT32	8Mo – 8V – 1,2Cr – 1,2Fe – 3Al	4,0	18,7
33	BT15	Ti – 11Cr – 7Mo – 3Al	4,0	25,3
β-сплави				
34	4201	Ti – 33Mo	1,0	33,0

Вплив легуючих елементів на температуру поліморфного перетворення титана



ВИКОРИСТАННЯ ТИТАНОВИХ СПЛАВІВ В АВІАЦІЙНИХ ДВИГУНАХ

Схема розташування деталей з титанових сплавів в авіаційному ГТД



- 1 – носок кока (ОТ4-0); 2 – робоча лопатка вентилятора (ВТ3-1); 3 – спрямлюючий апарат (ВТ3-1); 4 – тяговий кронштейн (ВТ9); 5 – форсунки (ВТ9); 6 – лопатки робочі КВТ (ВТ8, ВТ8М-1); 7 – лопатки робочі КНТ (ВТ3-1, ВТ8); 8 – корпус вентилятора (ВТ20); 9 – робоче колесо вентилятора (ВТ3-1); 10 – диски КНД (ВТ3-1; ВТ8); 11 – диски КВТ (ВТ8, ВТ9, ВТ25У); 12 – стекатель (ВТ20); 13 – кожух обдування статора турбіни (ВТ20).

Питома міцність сталей, алюмінієвих і титанових сплавів, застосовуваних у ГТД

Марка сплаву		ρ , г/см ³	σ_b , МПа	σ_b/ρ , МПа г/см ³
Алюмінієві сплави	АК4-1	2,80	420	15
	Д16Т	2,87	450	16,2
	В95	2,85	520	18,2
Титанові сплави	ОТ4	4,55	800	17,5
	ВТ6ч	4,55	900	20
	ВТ8М	4,55	1100	24,2
Сталі	30ХГСА	7,85	1100	14
	ЭИ643	7,81	1800	23
	ВНС-2	7,76	1250	16
	ВНС-5	7,82	1450	18,5

ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНО-АНАЛІТИЧНИЙ МЕТОД ВИЗНАЧЕННЯ В'ЯЗКОПЛАСТИЧНОЇ МОДЕЛІ ДЕФОРМУВАННЯ ТИТАНОВИХ СПЛАВІВ ПРИ ФОРМОУТВОРЕННІ МЕМБРАНИ

Схема навантаження

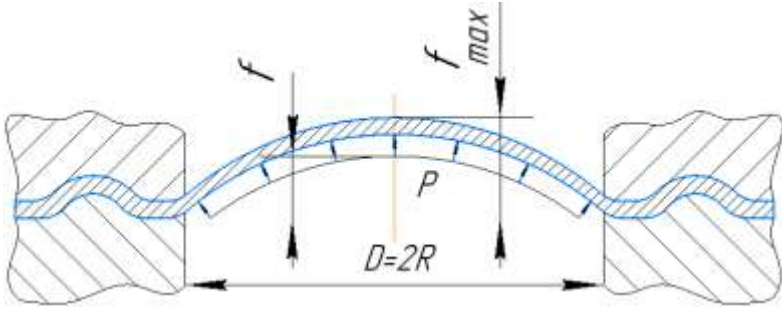


Фото заготовки

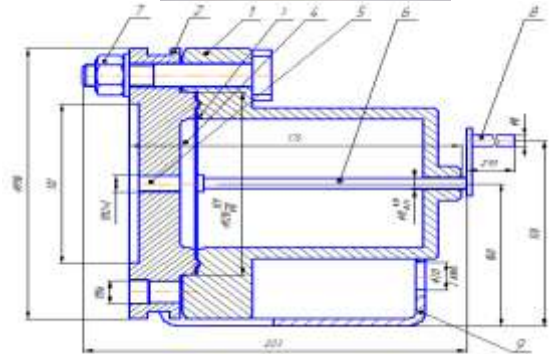
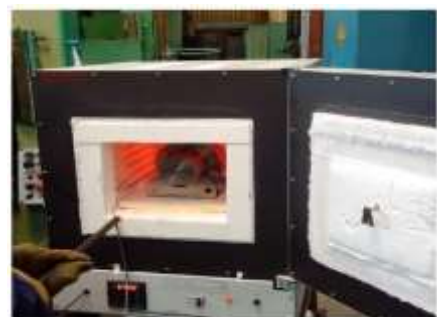
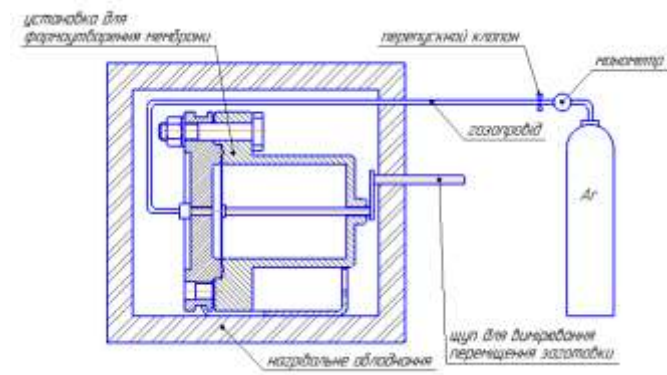


Схема процесу



Форма мембран від часу витримки заготовки під постійним тиском при різних температурах деформування

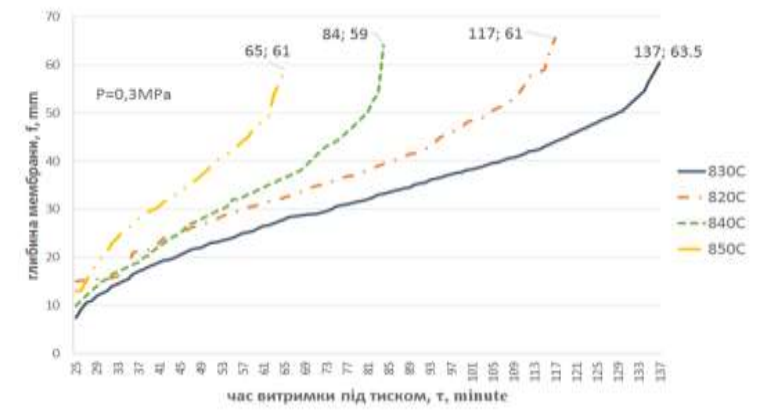


T=830°



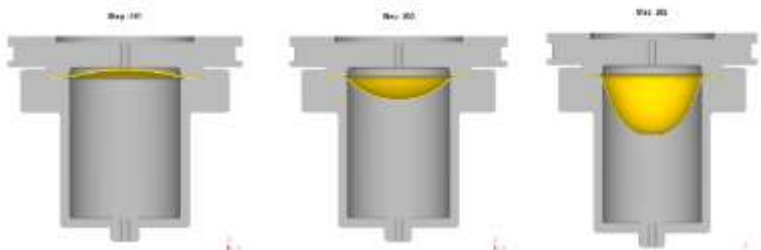
T=840°

Максимальна глибина формоутворення мембрани в залежності від температури

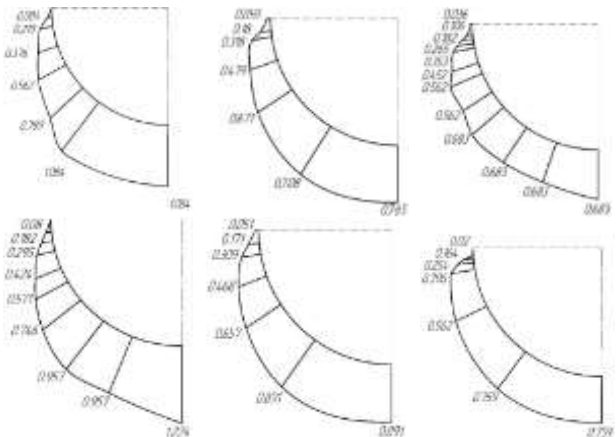


ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНО-АНАЛІТИЧНИЙ МЕТОД ВИЗНАЧЕННЯ В'ЯЗКОПЛАСТИЧНОЇ МОДЕЛІ ДЕФОРМУВАННЯ ТИТАНОВИХ СПЛАВІВ ПРИ ФОРМОУТВОРЕННІ МЕМБРАНИ

Чисельне моделювання формоутворення мембрани



Залежність максимальної величини деформації потоншення в центрі тиску від коефіцієнта швидкісного зміцнення та тиску



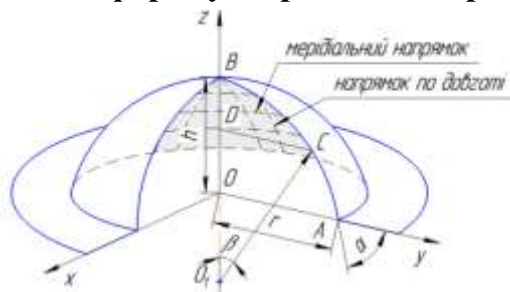
0,3МПа

0,4МПа

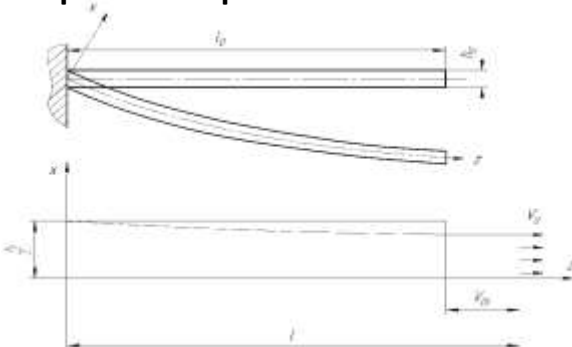
Залежність деформації потоншення (ε₁) від коефіцієнта (m) та тиску (P)

		Коефіцієнт швидкісного зміцнення - m		
		0.3	0.5	0.9
Тиск деформуючого середовища P, МПа	0.5	1.509	0.908	0.823
	0.4	1.224	0.891	0.759
	0.3	1.032	0.785	0.689

Схема формоутворення мембрани



Розрахункова схема потоншення твірної мембрани



Використано принцип балансу роботи зовнішніх та внутрішніх сил

$$A_0 = A_{\text{ЗОВН.}}$$

Робота зовнішніх сил визначається експериментально:

$$A_{\text{ЗОВН.}} = p \cdot W_i$$

Визначальне рівняння:

$$\int_t \iiint_{(\omega)} \sigma_i \cdot \varepsilon_i \cdot d\omega \cdot dt = p \cdot W_i$$

Швидкість переміщення часток матеріалу

$$V_z = V_0 \frac{Z^{2m}}{(l_0 + V_0 t)^{2m}}$$

$$V_x = -V_0 \frac{2x \cdot Z^{2m-1} \cdot m}{(l_0 + V_0 t) \cdot l^{2m}}$$

де m – коефіцієнт швидкісного зміцнення

Швидкості деформацій

$$\left\{ \begin{array}{l} \varepsilon_{zz} = \frac{V_0}{(l_0 + V_0 t)^{2m}} \cdot 2m \cdot z^{2m-1} \\ \varepsilon_{zz} = -\frac{V_0}{(l_0 + V_0 t)^{2m}} \cdot 2m \cdot z^{2m-1} \\ \varepsilon_{xz} = \frac{\partial V_z}{\partial x} + \frac{\partial V_x}{\partial z} \end{array} \right.$$

Модель матеріалу

$$\sigma_i = C \cdot \varepsilon^m$$

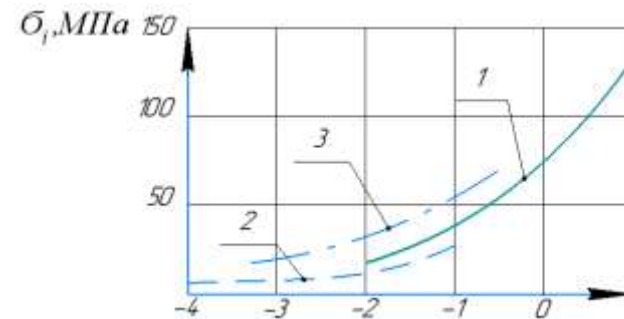
Питома робота деформацій

$$a_{\text{ПИТ}} = \sigma_i \cdot \varepsilon_i$$

Робота зовнішніх сил

$$A_0 = \int_t \iiint_{(\omega)} \sigma_i \cdot \varepsilon_i \cdot d\omega \cdot dt$$

Порівняння залежності напруження опору деформації титанового сплаву ВТ6

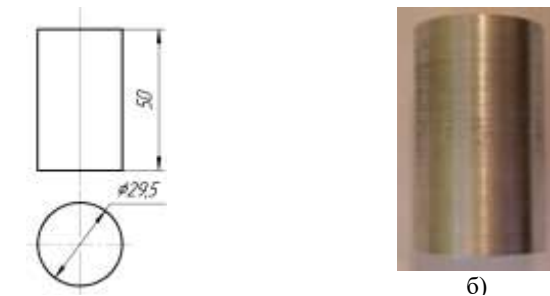
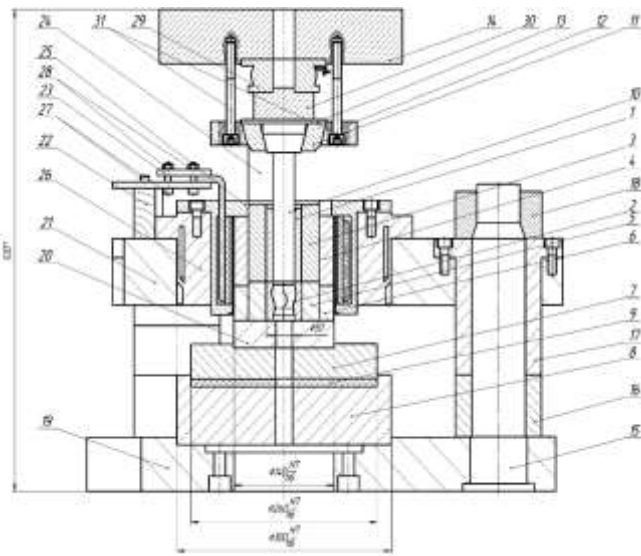
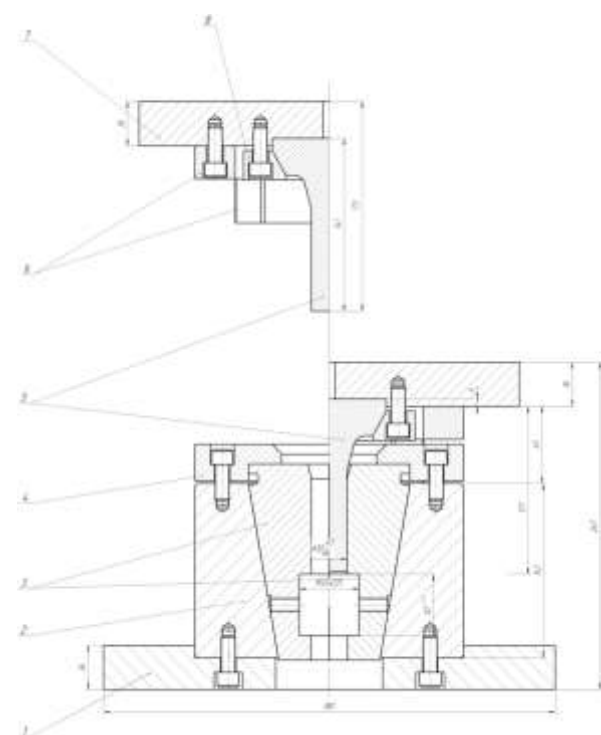


1 – по даним DeForm 3D;

2 – за результатами по методу на згин;

3 – за результатами по методу формовки мембрани;

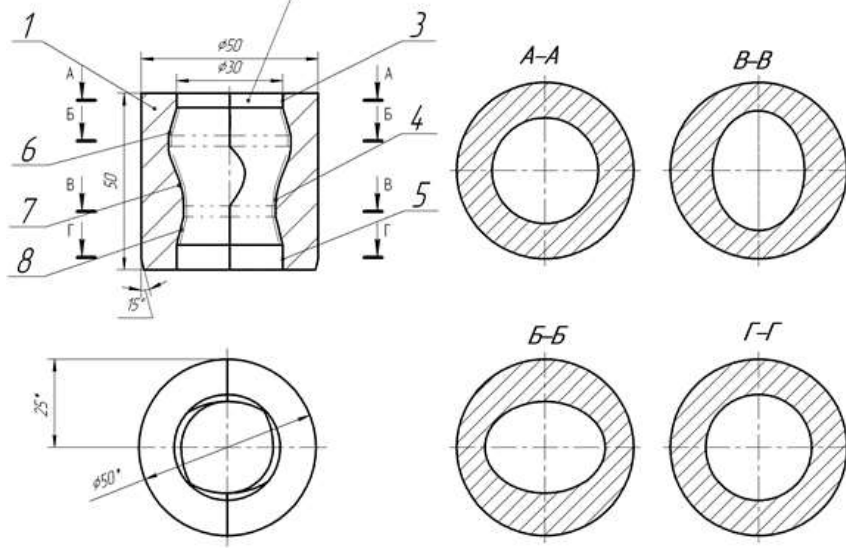
КЕРУВАННЯ СТРУКТУРОЮ ТА МЕХАНІЧНИМИ ВЛАСТИВОСТЯМИ ТИТАНОВИХ СПЛАВІВ ДЕФОРМАЦІЙНИМ ШЛЯХОМ З ВИКОРИСТАННЯМ ГВИНТОВОГО УШИРЯЮЧОГО ПРЕСУВАННЯ (обладнання та оснащення)



б)



Заготовка після деформування

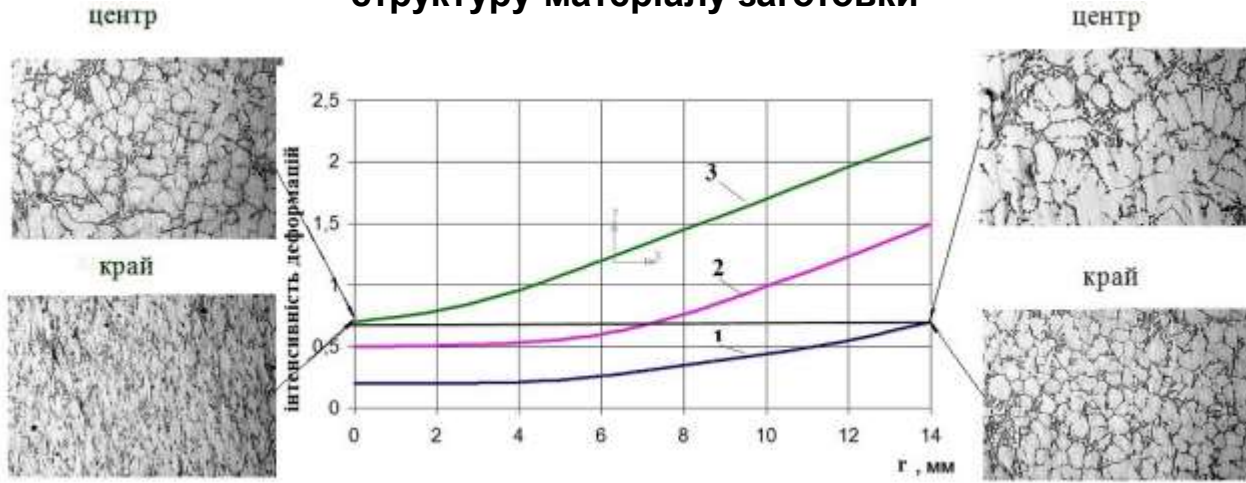


Матриця для процесу гвинтового уширюючого пресування

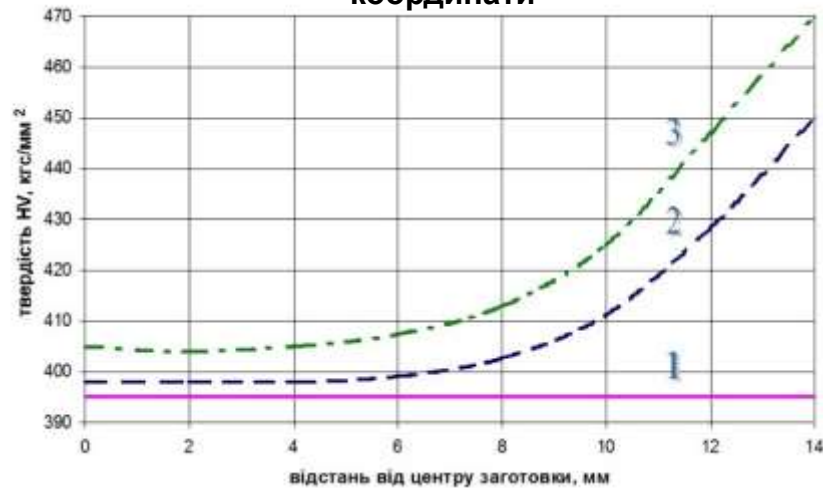
Ескіз та фото заготовки

КЕРУВАННЯ СТРУКТУРОЮ ТА МЕХАНІЧНИМИ ВЛАСТИВОСТЯМИ ТИТАНОВИХ СПЛАВІВ ДЕФОРМАЦІЙНИМ ШЛЯХОМ З ВИКОРИСТАННЯМ ГВИНТОВОГО УШИРЯЮЧОГО ПРЕСУВАННЯ (структура та механічні властивості)

Порівняння величини накопиченої інтенсивності деформацій для одного (1), двох (2), трьох (3) проходів та вплив цієї деформації на структуру матеріалу заготовки



Залежність мікротвердості сплаву TiV_n заготовки поздовж радіальної координати



1 – без обробки; 2 – після першого проходу

Металографічне дослідження зразка



а – зразок без обробки; б - зразок після обробки гвинтового уширюючого пресування

ПРОЦЕС ІЗОТЕРМІЧНОГО ПРЕСУВАННЯ ЗАГОТОВОК ЛОПАТОК КОМПРЕСОРА ГТД В ПРОМИСЛОВИХ УМОВАХ



Роз'ємні напівматриці

Загальний вигляд робочого місця

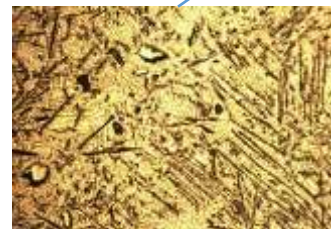
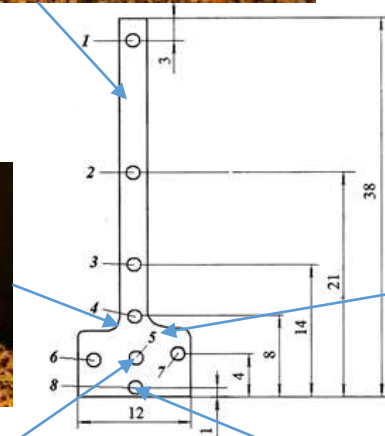


а - 850°C

б - 890°C

в - 930°C

Заготовки лопаток відпресовані при різних температурах

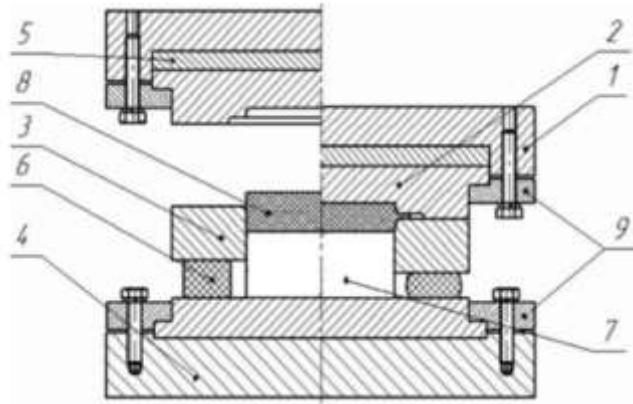


Мікроструктура заготовки лопатки (сплав ВТ6)

ВПЛИВ ОПЕРАЦІЙ ГАРЯЧОГО ШТАМПУВАННЯ НА СТРУКТУРУ І ВЛАСТИВОСТІ ТИТАНОМАТРИЧНИХ КОМПОЗИТІВ

Порошкові матеріали, які досліджувалися

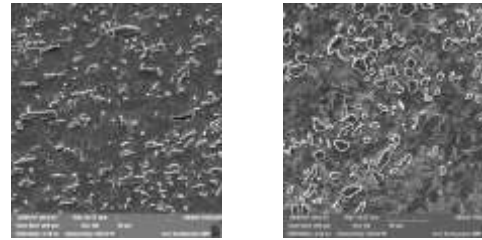
$TiH_2 - TiB_2$	$TiH_2 - Al - C$	$TiH_2 - Si - C$	$TiH_2 + 30\% \Phi MC + 5\% B_4C$
-----------------	------------------	------------------	-----------------------------------



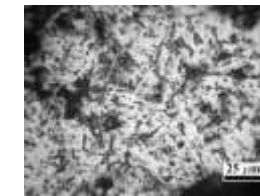
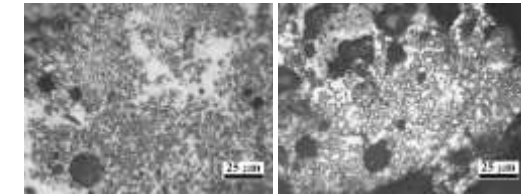
Штамп для гарячого штампування



Вихідні заготовки та зразки після шта

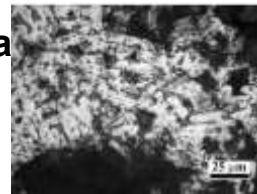
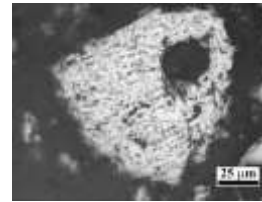
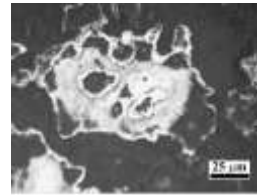


а - армованих 5 % TiB_2 ; б - TiC
Мікроструктури титанових композитів

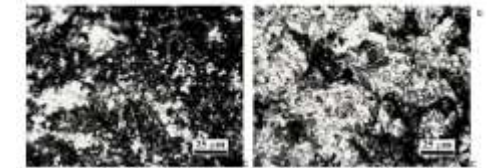
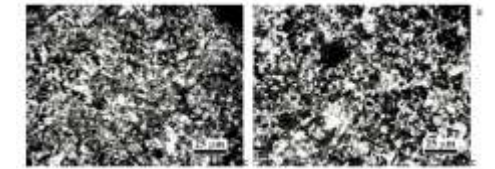


1150 (а), 1300 (б) та 1400°C (в)

Рисунок 6.30 - Мікроструктура сплавів системи $Ti-Si-C$, синтезованих при різних температурах



Мікроструктура сплавів $Ti-Al-C$, синтезованих при температурі 1150 (а), 1300 (б) та 1400°C (в)

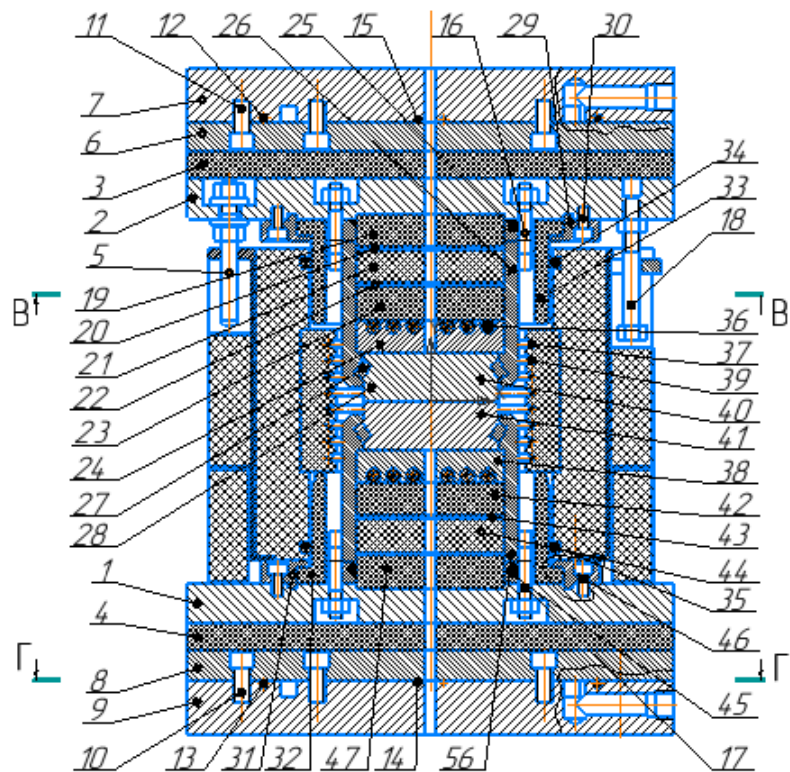


а - без МА, 0 - 5 хв. МА, °
б - 9 хв. МА, 7 - 12 хв. МА, °
в - 18 хв. МА, °
г - 18 хв. МА, °
д - 18 хв. МА, °

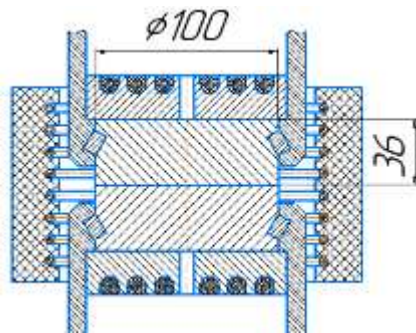
Мікроструктура спечених зразків, отриманих ті порожнистий суцільній, підданих різним видам обробки °

РОЗРОБКА ТА ПРОЕКТУВАННЯ ДОСЛІДНОЇ УСТАНОВКИ ДЛЯ ІЗОТЕРМІЧНОГО ПРЕСУВАННЯ ДЕТАЛЕЙ

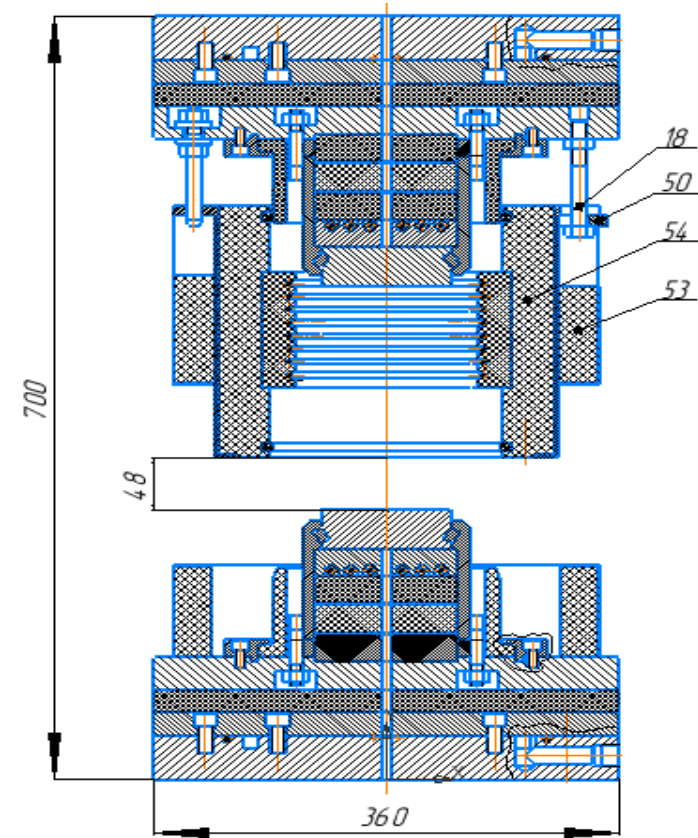
Складальне креслення установки



Робоча зона установки



Установка у відкритому положенні



Технічні характеристики установки

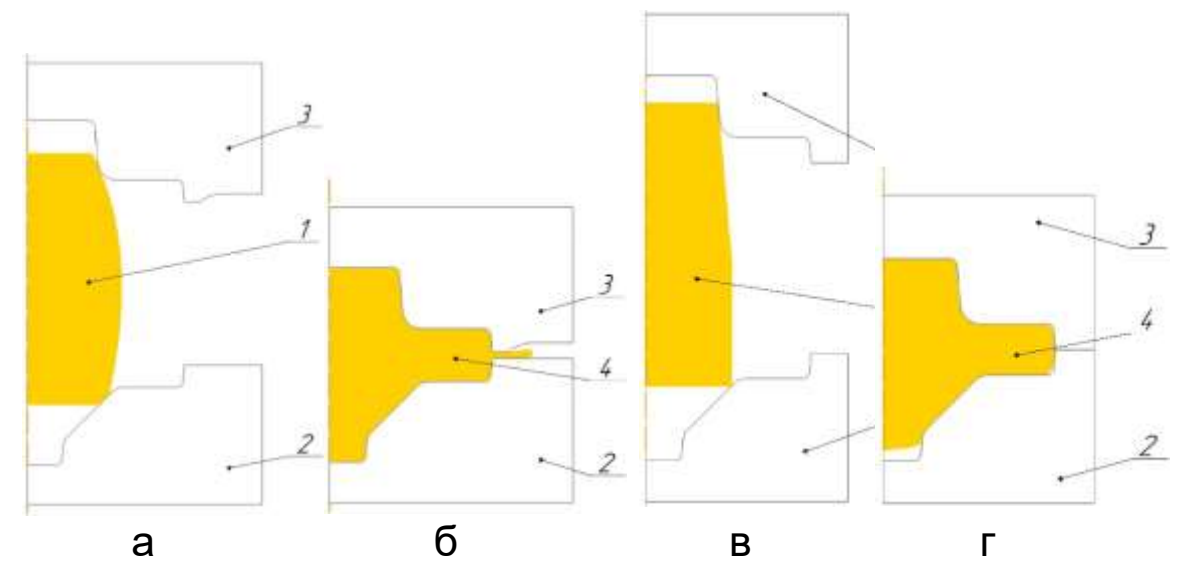
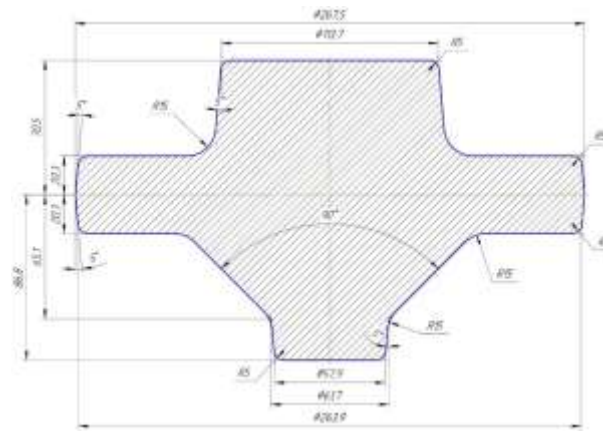
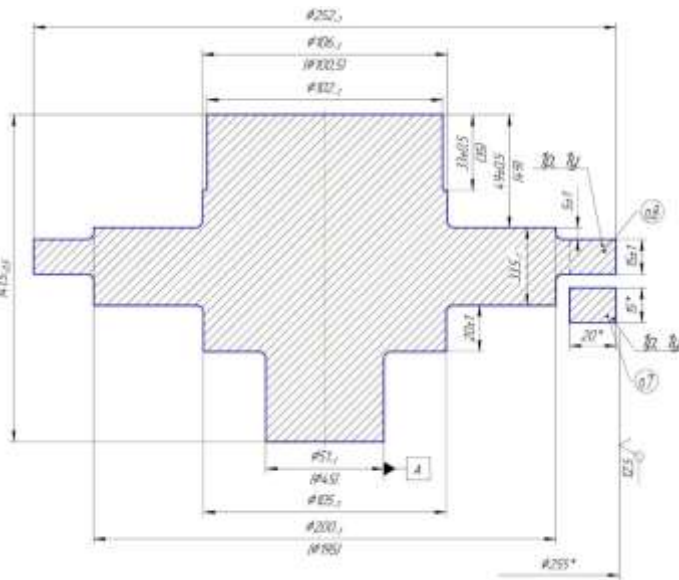
- Габарити штапового блоку, мм: $\phi 100 \times 72$;
- Робоча температура до: 1100°C ;
- Нагрівач електроопірний, потужністю до: 16кВт;
- Зусилля штампування (зусилля пресу) до: 1,6МН;

Подана заявка на патент: №u2023004811 від 12.10.2023р.

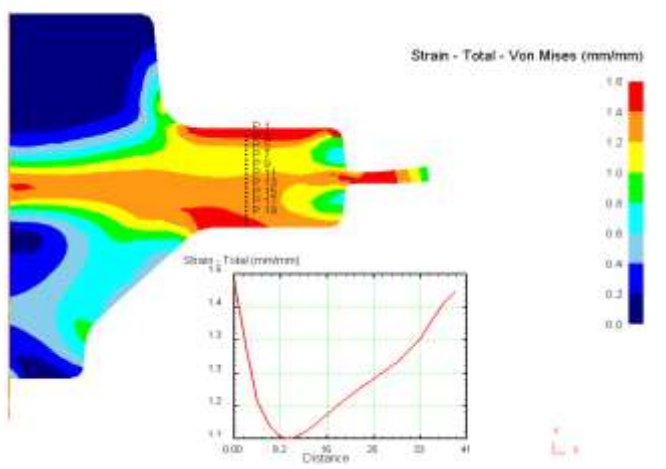
РОЗРОБКА ПРОЦЕСУ ІЗОТЕРМІЧНОГО ФОРМОУТВОРЕННЯ ДИСКА ТУРБІНИ КОМПРЕСОРА ДВИГУНА МС-500 ІЗ ТИТАНОВОГО СПЛАВУ ВТ6

Ескіз диску турбіни компресора

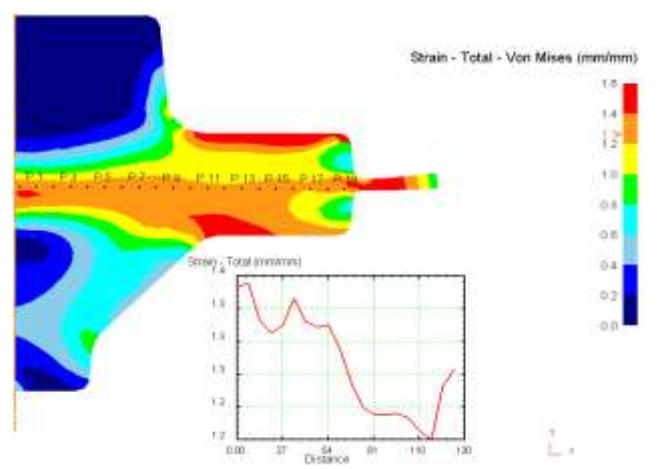
Викон диску турбіни компресора



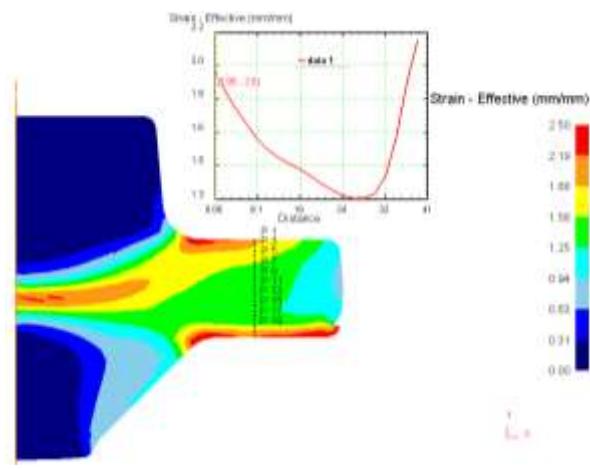
а – на початку процесу за схемою I; б – в кінці процесу за схемою I; в – на початку процесу за схемою II; г – в кінці процесу за схемою II
Розрахункові схеми процесу ізотермічного штампування



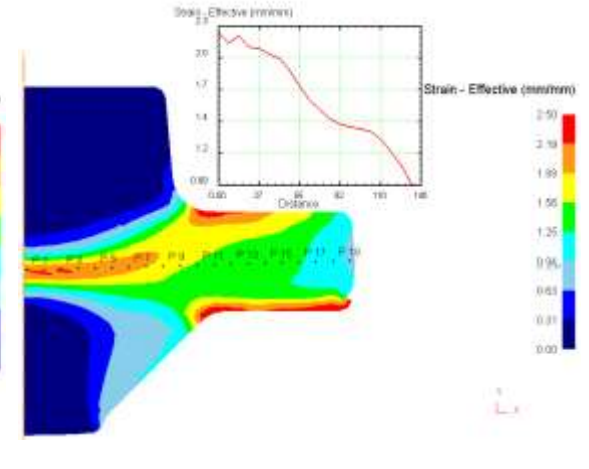
Розподіл інтенсивності деформацій за схемою I (осьовий напрямк)



Розподіл інтенсивності деформацій за схемою I (радіальний напрямк)



Розподіл інтенсивності деформацій за схемою II (осьовий напрямк)



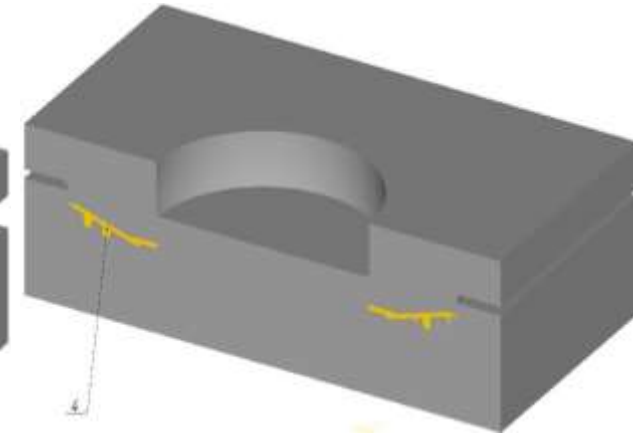
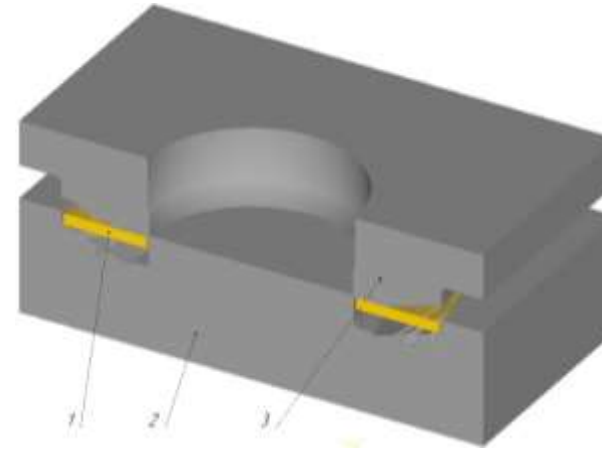
Розподіл інтенсивності деформацій за схемою II (радіальний напрямк)

РОЗРОБКА ПРОЦЕСУ ІЗОТЕРМІЧНОГО ФОРМОУТВОРЕННЯ МОНОКОЛЕСА ГТД ІЗ ТИТАНОВОГО СПЛАВУ ВТ6

Модель моноколеса

Кільцева заготовка

Конічна заготовка



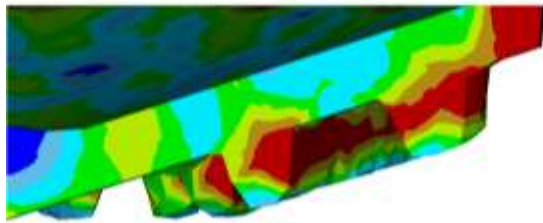
а

б

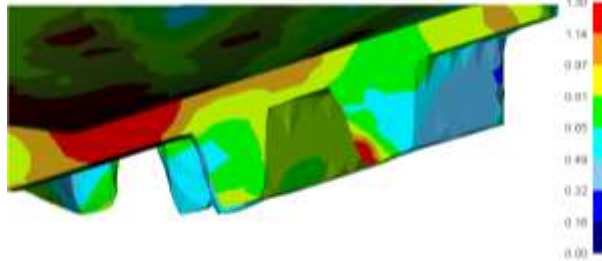
а – на початку штампування; б – в кінці штампування

Розрахункові схеми процесу ізотермічного штампування

Strain - Total - Von Mises (mm/mm)



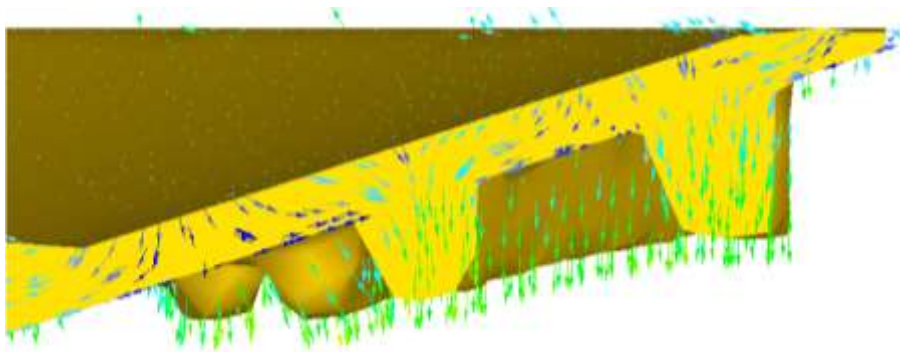
Strain - Total - Von Mises (mm/mm)



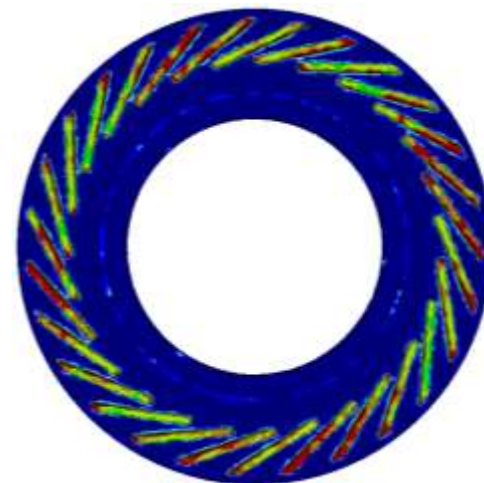
а

б

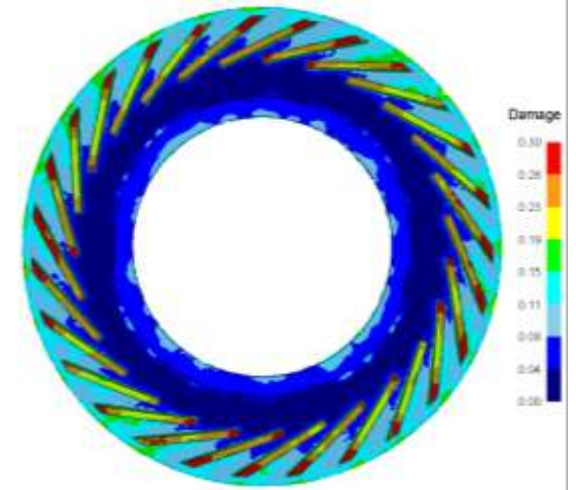
Розподіл інтенсивності деформацій в характерному перерізі
а – із кільцевої заготовки; б – із конічної заготовки



Напрямок течії металу в характерному перерізі



Використаний ресурс пластичності при ізотермічному штампуванні із конічної заготовки



Використаний ресурс пластичності при ізотермічному штампуванні із кільцевої заготовки

Порівняльна таблиця показників:

Назви показників	План	Факт
Опубліковані статті (кількість) в журналах, що індексуються наукометричними базами даних Scopus/ WoS	8	13
Патенти	3	2/3 заявки
Опубліковані за темою статті (кількість), які не увійшли до п.1 і 2, у журналах, що входять: <ul style="list-style-type: none"> до переліку фахових видань України; статті у закордонних журналах, статті у журналах, що рекомендовані секціями Наукової ради МОН охоронні документи на об'єкти права інтелектуальної власності 	10	12
Монографії (кількість), що опубліковані за темою дослідження (друкованих аркушів)	1	4
Підручники, навчальні посібники (кількість), що опубліковані за темою дослідження	-	1
Виконавцями захищено дисертацій на здобуття наукового ступеня кандидата (PhD) /доктора наук	3/2	-/-
Виконавці працювали за грантами (кількість), міжнародні/національні	-/-	-/-
Залучено госпдоговірної тематики за темою дослідження, тис. грн.	1100,00	-

Статті та тези у виданнях, що індексуються наукометричними базами даних Scopus/ WoS:

1. Effect of process parameters on AA6061/Q345 bimetal composite for hot stamping / Shao, Y., Peng, W., Cao, F., Oleksandr, M., **Titov, V.** // Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part E: Journal of Process Mechanical Engineering, 2022, 236(6), pp. 2515–2525 <https://doi.org/10.1177/09544089221096204>
2. The effect of the pre-rolling high-rolling curve of the ring rolling on the forming quality of large ring / Zhu, S., Peng, W., Chen, Z., Oleksandr, M., Titov, V. //International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2022, 121(1-2), pp. 1081–1089 <https://doi.org/10.1007/s00170-022-09334-6>
3. Evolution of microstructure of aluminum alloy hollow shaft in cross wedge rolling without mandrel / Yu, Z.-M., Peng, W.-F., Zhang, X., Oleksandr, M., Titov, V. //Journal of Central South University, 2022, 29(3), pp. 807–820 <https://doi.org/10.1007/s11771-022-4950-8>
4. Computer Simulation of Safety Processes of Composite Structures Rheological Properties / Savchenko, I., Shapoval, O., Chupilko, T., ...Titov, V., Shchepetov, V. //Proceedings of the 2022 IEEE 4th International Conference on Modern Electrical and Energy System, MEES 2022, 2022 <https://doi.org/10.1109/mees58014.2022.10005747>
5. Cross wedge roll bonding process for laminated shafts forming: Interface microstructure, bonding mechanism, and parameter influence Lin, L., Peng, W., Zhu, S., ...Oleksandr, M., Titov, V. Journal of Materials Processing Technology, 2023, 317, 117971 <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2023.117971>
6. Interface phenomena and bonding mechanism in the new method of cross wedge rolling bimetallic shaft /Lin, L., Peng, W., Titov, V., ...Wu, X., Li, H. // Journal of Materials Research and Technology, 2023, 24, pp. 1132–1149 <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2023.03.049>
7. Influence of Rare-Earth Metals on the Structure and Properties of Cast and Deformed Alloys of the Al-Mg-Cr-Sc-Zr System Ostash, O.P., Polyvoda, S.L., Chepil, R.V., Titov V.A. //..Voron, M.M., Holovchuk, M.Y., Materials Science, 2022, P.846-857. <https://link.springer.com/article/10.1007/s11003-022-00615-9>
8. Hrudkina N., Markov O., Shapoval A., Titov V., Aliiev I., Abhari P., Mali 7. K. Mathematical and Computer Simulation for the Appearance of Dimple Defect by Cold Combined Extrusion. FME Transactions. 2022. 50. 1, pp. 90-98. <https://doi.org/10.5937/fme2201090H>
9. Viacheslav Titov, Olexandr Mozghovyi, Ruslan Borys, Mykola Bogomolov, Yedilkhan Amirgaliyev, Zhalau Aitkulov Theoretical and experimental substantiation of the extraction process with thinning bimetallic tubular elements of dissimilar metals and alloys// Informatyka, automatyka, pomiary w gospodarce i ochronie środowiska, Poland, 2023. Vol. 13, no. 2. ISSN 2083-0157 <https://doi.org/10.35784/iapgos.3497>
10. Bagliuk, G., Maximova, G., Goncharuk, D. et al. The Structurization and Phase Formation of Fe–Ti–Ni–B4C Alloys in Thermal Synthesis. Powder Metall Met Ceram (2022). <https://doi.org/10.1007/s11106-022-00304-x>
11. Bagliuk G., Marich M., Mamonova A. Structure and Properties of TiCrFeNiC High Entropy Alloy Produced by Powder Metallurgy. JOJ Material Sci. 2022; 6(5): 555697. <https://doi.org/10.19080/JOJMS.2022.06.555697>
12. Buketov, A.V., Bagliuk, G.A., Sizonenko, O.M. et al. Effect of Particulate Ti–Al–TiC Reinforcements on the Mechanical Properties of Epoxy Polymer Composites. Powder Metall Met Ceram 61, 586–596 (2023). <https://doi.org/10.1007/s11106-023-00347-8>
13. Pressing of Semi-Finished Al–Mg–Sc Alloy Products in Isothermal Conditions A. V. Titov, K. B. Balushok, O. P. Ostash, V. A. Titov, V. O. Koreva, S. L. Polyvoda & R. V. Chepil Materials Science volume 58, pages636–642 (2023) https://link.springer.com/article/10.1007/s11003-023-00710-5#auth-A_V_Titov-Aff1

Фахові статті:

1. Корева В.О. Холодне прокатування алюмінієвого сплаву системи Al-Mg // Обробка матеріалів тиском: – Краматорск: ДДМА, – 2022. – № 1 (51). – С. 147-153. (фахове видання, кат. Б)
[http://www.dgma.donetsk.ua/science_public/omd/omd_1\(51\)_2022/article/20.pdf](http://www.dgma.donetsk.ua/science_public/omd/omd_1(51)_2022/article/20.pdf)
2. Тітов В. А., Назарук Т. О. Розробка методу розрахунку кривих деформування волокнистих композиційних матеріалів з металевою матрицею Обробка матеріалів тиском: Збірник наукових праць. – Краматорськ: ДДМА, 2022. – № 1 (51). – с. 55-61 [http://www.dgma.donetsk.ua/science_public/omd/omd_1\(51\)_2022/article/9.pdf](http://www.dgma.donetsk.ua/science_public/omd/omd_1(51)_2022/article/9.pdf)
3. Холявік, О., Ноговіцин, О., Кравчук, О., Самойленко, О., Борис, Р. Реологічні характеристики сталі при безперервній валковій розливці-прокатуванні. Mechanics and Advanced Technologies, 5(3). 2022. С. 114-125 <https://doi.org/10.20535/2521-1943.2021.5.3.250182>
4. Берник, І. Назаренко, і О. Луговський, «Дослідження та визначення акустичних параметрів руху кавітаційної бульбашки в рідинному середовищі за дискретною та континуальною моделями», Mech. Adv. Technol., т. 6, вип. 2, с. 195–202, 2022. <https://doi.org/10.20535/2521-1943.2022.6.2.269921> <https://ela.kpi.ua/handle/123456789/55276>
5. Тітов В.А. Максимів І.М. Герасимов В.О. Аналіз процесу обтиску товстостінної циліндричної заготовки. Обробка матеріалів тиском. №1(52) (Лис 2023), DOI: [https://doi.org/10.37142/2076-2151/2023-1\(52\)42](https://doi.org/10.37142/2076-2151/2023-1(52)42)
6. Тітов, А.В., Балушок, К.Б., Осташ, О. П., Тітов, В. А., Корева, В.О., Поливода, С. Л., Чепіль, Р. В. (2022). Пресування напівфабрикатів зі сплавів системи Al-Mg-Sc в ізотермічних умовах. Фізико-хімічна механіка матеріалів, 58(5), 120–127. <http://pcmm.ipm.lviv.ua/pcmm-2022-5u.pdf>
7. Баглюк Г. А., Марич М. В., Кирилюк С. Ф., Мисливченко О. М., Голубенко О. А., Макаренко О. С. Порівняльна аналіза структури, фазового складу та властивостей високоентропійних керметів системи Ti–Cr–Fe–Ni–C, одержаних методами порошкової металургії та дугового перетоплення // Металофізика та новітні технології. - 2023. - Vol. 45, No. 4. - С. 537–553 <https://mfint.imp.kiev.ua/ua/abstract/v45/i04/0537.html>

Монографії

1. Обобщенный вариационный метод решения статических и динамических аналитических краевых задач макро, микро, наносистем: монография Богуслаев В.А., Борисевич В.В., Борисевич В.К., Балушок К.Б., Долматов А.И., Титов В.А. Сабакарь А.И. Третьяк В.В. Национальным аэрокосмическим университетом им. Н.Е. Жуковского «ХАИ» 2022 -243с.
2. Луговський О.Ф. Ультразвукові технологічні процеси. Розпилення та екстрагування. Монографія. / О.Ф. Луговський, А.В. Шульга, І.М. Берник, І.А. Гришко, А.В. Мовчанюк., А.І. Зілінський - К: КПІ ім. Ігоря Сікорського, Видавець ФОП Кушнір Ю.В., 2022. – 285 с.
3. Луговський О.Ф. Ультразвукові кавітаційні технології очищення. Монографія. / О.Ф. Луговський, І.А. Гришко, А.І. Зілінський, А.В. Мовчанюк., І.М. Берник - К: КПІ ім. Ігоря Сікорського, Видавець ФОП Кушнір Ю.В., 2022. – 213 с.

Підручники

1. ТЕХНОЛОГІЇ ВИГОТОВЛЕННЯ ДЕТАЛЕЙ З ГУМИ ТА ПЛАСТМАС. ОСНОВИ ПРОЕКТУВАННЯ ПРЕС-ФОРМ Навчальний посібник з вибіркової компоненти "" для студентів галузі знань 13 Механічна інженерія, спеціальності 131 Прикладна механіка усіх форм навчання. / Уклад. Злочевська Н.К., Титов В.А.– Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2022. – 70 с. https://ela.kpi.ua/bitstream/123456789/54305/1/Osnovy_proektuvannia_detalei_Praktychni_zaniattia.pdf
2. ТЕХНОЛОГІЇ ВИГОТОВЛЕННЯ ДЕТАЛЕЙ З ГУМИ ТА ПЛАСТМАС. ОСНОВИ ПРОЕКТУВАННЯ ПРЕС-ФОРМ Навчальний посібник з вибіркової компоненти відноситься до циклу професійної та практичної підготовки освітньо-професійного рівня «бакалавр з інженерної механіки» для студентів галузі знань 13 Механічна інженерія, спеціальності 131 Прикладна механіка усіх форм навчання. / Уклад. Злочевська Н.К., Титов В.А.– Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2022. – 76 с. <https://ela.kpi.ua/handle/123456789/54218>
3. Теорія пластичної деформації-1. фізико-механічні основи пластичної деформації: конспект лекцій [Електронний ресурс] : навч. посіб. для студ. спеціальності 131 «Прикладна механіка», освітня програма «Прикладна механіка пластичності матеріалів» / КПІ ім. Ігоря Сікорського ; уклад.: В.А. Титов, Н.К. Злочевська. – Електронні текстові дані (1 файл: 1,95 Мбайт). – Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2022. – 70 с. <https://ela.kpi.ua/handle/123456789/54301>

Плани авторів проєкту щодо подальших кроків

