

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ЗАПОРІЗЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

Машинобудівний
(повне найменування інституту, назва факультету)
Обробка металів тиском
(повна назва кафедри)

Пояснювальна записка

до магістерської роботи

магістр
(рівень вищої освіти (освітньо-кваліфікаційний рівень))

на тему Дослідження впливу технологічних параметрів виробництва на якість виробів типу лопаток газотурбінних двигунів

Виконав: студент VI курсу, групи М-813.4
спеціальності (напряму підготовки)

Інженерна механіка
(код і назва напряму підготовки, спеціальності)

Сідомон Д. І.
(прізвище та ініціали)

Керівник і.н.проф Дубина В. І.
(прізвище та ініціали)

Рецензент В. К.
(прізвище та ініціали)

м. Запоріжжя
2018 рік

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
Запорізький національний технічний університет
 (повне найменування вищого навчального закладу)

Інститут, факультет Машинобудівний, МР
 Кафедра ОМТ
 Рівень вищої освіти (освітньо-кваліфікаційний рівень) магістр
 Спеціальність Обладн. та техн. зас. форм. конструкції машинобуд.
 (код і назва)
 Напрямок підготовки 131 Інженерна механіка
 (код і назва)

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри [підпис]

“18” 12 2018 року

З А В Д А Н Н Я
НА МАГІСТЕРСЬКУ РОБОТУ СТУДЕНТУ

Сідомон Іна Геннадівна
 (прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи Дослідження впливу механологічних параметрів виробництва на якість виробів типу лопаток

керівник роботи Дубина В. Г., професор
 (прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)

затвержені наказом вищого навчального закладу від “23” листопада 2018 року № 362

2. Строк подання студентом роботи 17 грудня 2018

3. Вихідні дані до роботи креслення збірки лопатки компресорної машини авіаційного двигуна

4. Зміст розрахунково-пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити) 1. Способи виготовлення збірок компресорних лопаток; 2. методика виконання досліджень; 3. результати досліджень; 4. діаграма праці і навантаження в надзвукових ситуаціях

5. Перелік графічного матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових креслень)

презентаційний матеріал

6. Консультанти розділів роботи

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	Прийняв виконання завданн.
1	Способи виготовлення роторних компресорних лопаток Беню А.М.	А. Беню	А. Беню
2	Методика виконання досліджень Беню А.М.	А. Беню	А. Беню
3	Результатами досліджень Беню А.М.	А. Беню	А. Беню
4	Охорона праці і безпека в надзвичайних ситуаціях з кафе. Костерів О.В. Норма контролю А.Ю. Матиючін		

7. Дата видачі завдання

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів магістерської роботи	Строк виконання етапів роботи	Примі
1	Способи виготовлення роторних компресорних лопаток А.М. Беню	10.09.2018	
2	Методика виконання досліджень А.М. Беню	15.10.2018	
3	Результатами досліджень А.М. Беню	19.11.2018	
4	Охорона праці і безпека в надзвичайних ситуаціях з кафе О.В. Костерів	10.12.2018	

Студент

(підпис)

Сідоман П.І.

(прізвище та ініціали)

Керівник роботи

(підпис)

В.Ч. Дубина

(прізвище та ініціали)

РЕФЕРАТ

ПЗ.: 125 с., рис. 90, джерела 27.

Об'єкт дослідження – заготовки компресорних лопаток авіаційних двигунів.

Мета – визначення впливу технологічних параметрів виробництва на якість виробів типу лопаток авіаційних двигунів методом гарячого видавлювання.

В роботі проведено аналіз існуючих способів виробництва лопаток компресора, вказано перспективні способи виготовлення, досліджено спосіб отримання заготовки методом гарячого видавлювання, змодельовано процес видавлювання у програмному продукті при різних температурах та швидкостях деформації. Обрано найбільш раціональні технологічні параметри виготовлення, зроблено відповідні висновки.

ЛОПАТКА, ОБЛОЙ, ПЕРО, ОБРОБКА, КОМПРЕСОР, ГАРЯЧЕ ШТАМПУВАННЯ, ВИДАВЛЮВАННЯ, ТОЧНІСТЬ, ПОПЕРЕЧНИЙ ПЕРЕРІЗ

РЕФЕРАТ

ПЗ.: 125 с., рис. 90, источники 27.

Объект исследования – заготовки компрессорных лопаток авиационных двигателей.

Цель – определение влияния технологических параметров производства на качество изделий типа лопаток авиационных двигателей методом горячего выдавливания.

В работе проведен анализ существующих способов производства лопаток компрессора, указаны перспективные способы производства, исследован способ получения заготовки методом горячего выдавливания, смоделирован процесс выдавливания в программном продукте при разных температурах и скоростях деформации. Выбраны наиболее рациональные технологические параметры производства, сделаны соответствующие выводы.

ЛОПАТКА, ОБЛОЙ, ПЕРО, ОБРАБОТКА, КОМПРЕССОР, ГОРЯЧАЯ ШТАМПОВКА, ВЫДАВЛИВАНИЕ, ТОЧНОСТЬ, ПОПЕРЕЧНОЕ СЕЧЕНИЕ

ABSTRACT

EN – 125 p., Fig. 90, Sources 27.

The object of study is the compressor blades blank for aircraft engines.

The purpose is to determine the production technological parameters influence on the quality of products such as aircraft engines blades by hot extrusion.

The paper analyzes the existing methods of compressor blades manufacturing, indicates promising production methods, studies the method for producing blanks by hot extrusion, simulates the extrusion process in a software product at different temperatures and strain rates. The most rational technological parameters of production were chosen; the corresponding conclusions were made.

BLADE, BALDNESS, FEATHER, TREATMENT, COMPRESSOR, HOT STAMPING, EXTRUSION, ACCURACY, TRANSVERSE SECTION

ЗМІСТ

Перелік умовних позначень	9
Вступ.....	10
1 Способи виготовлення заготовок компресорних лопаток.....	12
1.1 Технологія виготовлення лопаток першої ступені компресора.....	12
1.2 Традиційний спосіб виготовлення компресорних лопаток	15
1.3 Приклад технологічного процесу виготовлення заготовки компресорної лопатки	17
1.4 Спосіб отримання заготовок компресорних лопаток методом точного штампування.....	21
1.5 Спосіб отримання заготовок компресорних лопаток ізотермічним штампуванням	22
1.6 Високошвидкісне об'ємне штампування заготовок компресорних лопаток	24
1.7 Спосіб отримання заготовок компресорних лопаток поздовжнім періодичним прокатуванням.....	26
1.8 Спосіб отримання заготовок компресорних лопаток вальцюванням.....	27
1.9 Виготовлення лопатки компресора фрезеруванням.....	29
1.10 Особливості технології обробки компресорних лопаток турбореактивних двигунів	34
1.11 Проектування технологічного процесу виготовлення лопаток з полімерних композиційних матеріалів.....	36
1.12 Перспективний технологічний процес виготовлення прецизійних компресорних лопаток.....	40
1.13 Спосіб отримання заготовок компресорних лопаток видавлюванням	43
1.14 Особливості процесів формоутворення заготовок лопаток з титанового сплаву системи Ti-TiVn	46
Висновки	47

2	Методика виконання досліджень	49
2.1	Основні особливості системи <i>QForm</i>	49
2.2	Особливості технологічного процесу	54
2.3	Методика виконання досліджень	56
	Висновки	62
3	Результати досліджень.....	63
3.1	Алгоритм створення розрахункової моделі в <i>QForm</i>	63
3.2	Моделювання процесу видавлювання заготовки компресорної лопатки на кривошипному пресі.....	71
3.2.1	Моделювання процесу деформування при температурі 800°C	71
3.2.2	Моделювання процесу деформування при температурі 850°C	78
3.2.3	Моделювання процесу деформування при температурі t 900°C	85
3.2.5	Моделювання процесу деформування при температурі t 1000°C	92
3.3	Моделювання процесу видавлювання заготовки компресорної лопатки на гідравлічному пресі при температурі t 850°C	100
4.	ОХОРОНА ПРАЦІ І НЕБЕЗПЕКА В НАДЗВИЧАЙНИХ СИТУАЦІЯХ ..	108
4.1	Аналіз потенційних небезпек	108
4.2	Заходи по забезпеченню безпеки	111
4.3	Заходи по забезпеченню виробничої санітарної та гігієни праці	117
4.4	Заходи з пожежної безпеки	118
4.5	Заходи по забезпеченню безпеки у надзвичайних ситуаціях.....	118
	Висновки	120
	Перелік посилань.....	122

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ

ГКМ – горизонтально-кувальна машина;

ГТД – газотурбінний двигун;

КГШП – кривошипний гаряче штампувальний прес;

ГП – гідравлічний прес;

ПШМ – повітряно-штампувальний молот;

КВМ – коефіцієнт використання металу;

ПКМ – полімерний композиційний матеріал;

ЕХО – електро-хімічна обробка;

МСЕ – метод скінчених елементів;

ЕОМ – електронна обчислювальна машина;

НС – надзвичайна ситуація;

ЕМІ – електромагнітний імпульс.

ВСТУП

Підвищення ресурсу і надійності авіаційних двигунів дозволяє в значній мірі визначити економічність, конкурентоспроможність і безпеку польотів.

Рівень розвитку технології отримання заготовок лопаток авіаційних двигунів визначає ступінь досконалості виробництва в цілому і структуру основних виробничих фондів, так як до 35% трудомісткості обробки деталей і збірки доводиться на виготовлення лопаток [1].

Компресорна лопатка авіаційного двигуна одна з найбільш важливих і масових деталей в авіаційному машинобудуванні. Тому в роботі головним завданням є підвищення якості виготовлення лопаток. Проаналізуємо технологію виготовлення компресорних лопаток.

Способи виготовлення компресорних лопаток досить різноманітні.

У даній роботі розглянуті такі способи: фрезерування, волочіння, видавлювання, точне штампування, гаряче штампування, періодичне прокатування та ін.

Впровадження запропонованих технологій в процес виробництва компресорних лопаток гарантує отримання деталей із заданою точністю, якістю поверхні і експлуатаційними характеристиками.

Основними конструктивними елементами лопатки є перо і коренева частина - замок.

Перо лопатки має складну просторову форму з постійними або змінними профілями поперечних перерізів по довжині. Перерізи можуть бути повернені відносно один одного, утворюючи закрутку пера, що доходить до 60°. Опуклу сторону пера прийнято називати спинкою, а увігнуту - коритом. Кромку пера з боку входу газу називають вхідною (передньою), а протилежну - вихідною (задньою). У більшості лопаток кромка має складну

геометричну форму з гвинтовим розташуванням в просторі. Величина радіусу заокруглення кромки буває дуже мала, до 0,05 мм [1].

Лопатки компресора характеризуються різноманітністю конструкцій, великим діапазоном розмірів і широкою номенклатурою застосовуваних матеріалів.

Найбільше поширення мають лопатки середніх розмірів. В діапазоні лопаток довжиною пера від 80 до 180 мм найчастіше зустрічаються конструкції з хвостовиком типу «ластівчин хвіст». Іноді ці лопатки мають антивібраційні полки. Є лопатки з так званим шарнірним хвостовиком. Розвиток конструкцій лопаток має тенденцію до зменшення товщини пера, стоншування кромки. Така маложорстка конструкція пера лопаток накладає певні умови на технологію обробки. Лопатки з довжиною пера до 80 мм, як правило, однозамкові з хвостовиком типу «ластівчин хвіст» [2].

За конструктивною ознакою лопатки компресора можна класифікувати на три класи: лопатки окремі, лопатки в секторах і моноколеса.

1 СПОСОБИ ВИГОТОВЛЕННЯ ЗАГОТОВОК КОМПРЕСОРНИХ ЛОПАТОК

1.1 Технологія виготовлення лопаток першої ступені компресора

Робочі лопатки компресорів підлягають значним осьовим і радіальним навантаженням. Профільна частина - перо - крім розтягування від відцентрових сил, вигину і кручення піддається змінним напруженням від вібраційних навантажень. При зльоті і крейсерському режимі літального апарату температурний режим в компресорі змінюється. Ці зміни проявляються у всіх ступенях компресора. Так, перша ступінь компресора, що має великогабаритні лопатки, зазнає змін температурного режиму від +50 до - 500°C.

Для виробництва лопаток першої ступені компресора використовуються якісні матеріали. В сучасних ГТД, використовуються леговані сталі або титанові сплави. Лопатка першої ступені компресора, показана на (рис. 1.1), виготовлена з титанового сплаву ВТ-9. [3]

Вихідні заготовки лопаток першої ступені компресора отримують методом штампування. При цьому можуть бути отримані заготовки підвищеної точності, з малими припусками на механічну обробку. Штампування невисокої точності збільшують припуски і напуски і вимагають значної кількості операцій для подальшої механічної обробки.

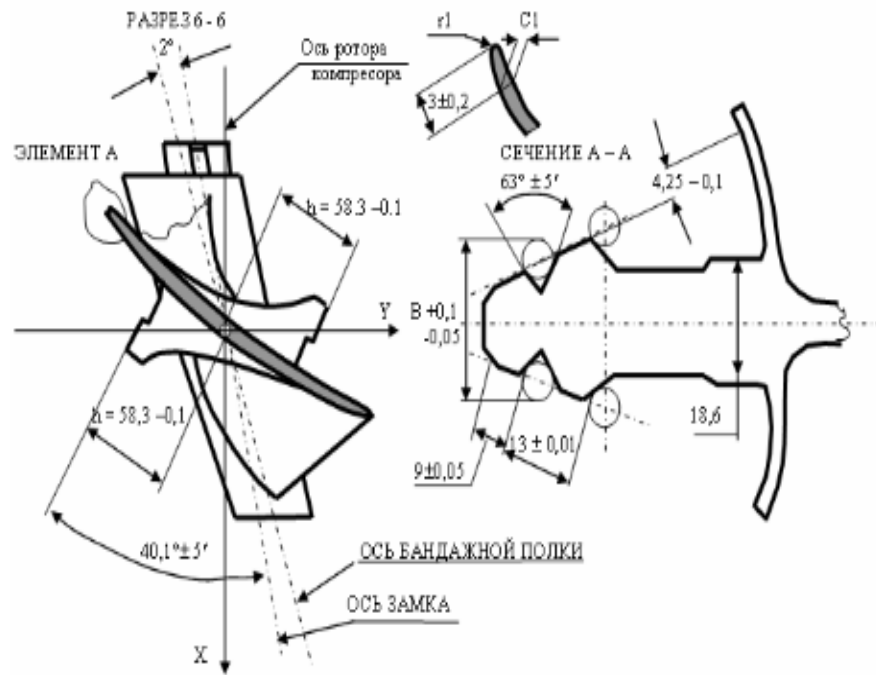


Рисунок 1.1 - Лопатка першої ступені компресора

Розглянуто технологічний процес виготовлення лопаток першої ступені компресора, вихідна заготовка якої, отримана методом гарячого штампування звичайної точності (рис. 1.2). Обробка ведеться на кривошипно-шатунних пресах відповідно до технічних вимог.

Штампувальні нахили складають $7...10^\circ$. Радіуси переходу поверхонь штампування виконуються в межах $R=4$ мм. Допуски на горизонтальні і вертикальні розміри відповідно до IT-15. Допустиме зміщення по лінії роз'єму штампів не більше 2 мм. Перо вихідної заготовки піддається профільованій обкатці. Сліди від облою по всьому контуру заготовки не повинні перевищувати 1 мм.

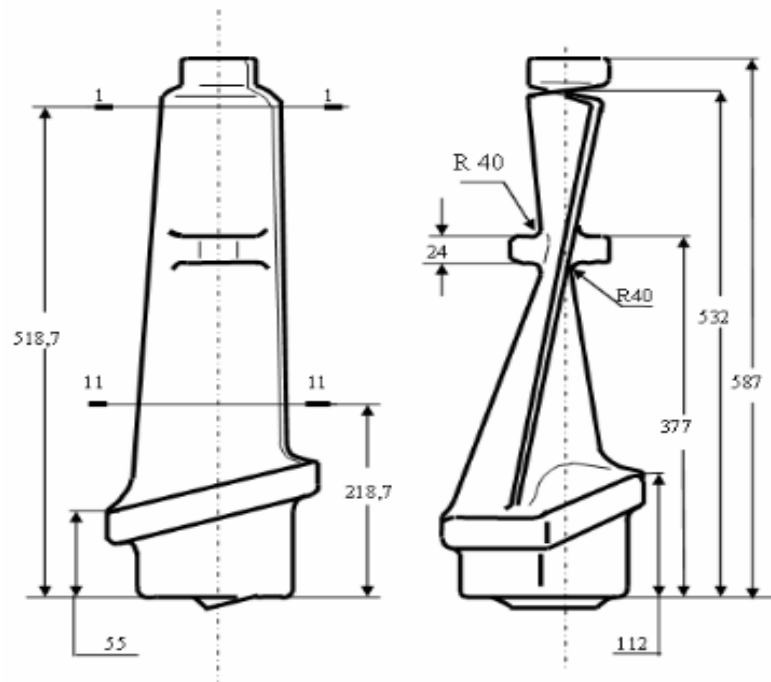


Рисунок 1.2 - Вихідна заготовка лопатки першої ступені компресора

Механічна обробка заготовок розділена на 5 основних частин:

1. Забезпечується формування базових установчих поверхонь і виконується знімання основного припуску із заготовки. При цьому здійснюється фрезерування слідів від облою на вхідних і вихідних торцях замка і технологічного прибутку, видаляються сліди від облою по контуру пера і інших елементів вихідної заготовки. Підготовка базових установчих поверхонь (центрових отворів) виконується таким чином, щоб забезпечити рівномірний розподіл припуску по робочому профілю пера лопатки щодо технологічних базових поверхонь. Досягається поєднання середньої площини пера із площиною симетрії контрольно-вимірального приладу.

2. Здійснюється точне орієнтування заготовки щодо профілю пера лопатки, оновлюються базові установчі поверхні і проводяться чистові операції для основних елементів лопаток. Забезпечується формування якісних основних показників лопатки. На цьому етапі виконуються геометричні параметри пера і його положення щодо замка лопатки.

3. Проводиться остаточне доведення робочих поверхонь лопаток, здійснюється контроль тріщин і проводиться стабілізуюче відпалення, що виправляє можливі дефекти. Заготовка підлягає оздоблювальній обробці. При поліруванні пера лопатки забезпечується підвищення шорсткості поверхонь, а припуск, який видаляється з утворюючих поверхонь пера, практично не змінює положення профілю щодо номінального, так як здійснюється копіювання положення, отриманого при чистовій обробці пера. Виходячи з цього сумарна похибка розташування профілю пера лопатки щодо замку залишається практично незмінною після проведення другої частини технологічного процесу.

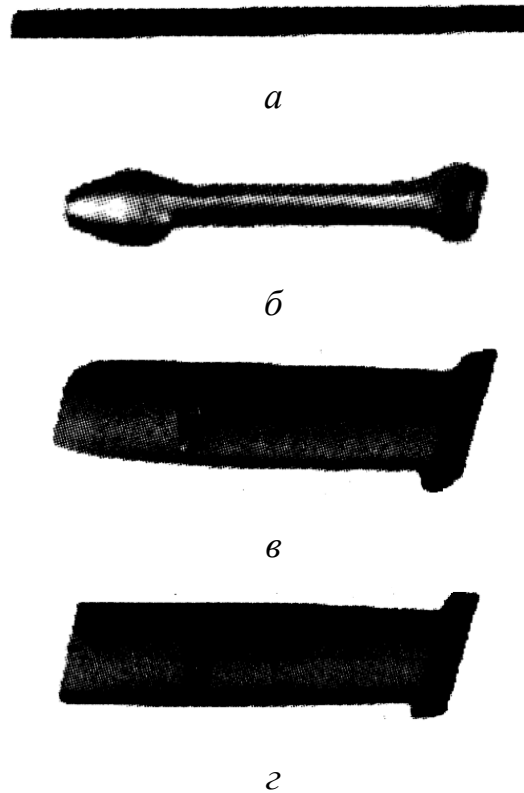
4. Проводиться відрізка технологічного прибутку, доведення різних елементів лопатки і виконується контроль мікроструктури матеріалу на спеціальних зразках.

5. Здійснюється гідродробеструйна обробка робочих поверхонь лопаток, нанесення твродсплавного покриття (WC, TiC) на стикові поверхні проміжних полиць і остаточне доведення відповідальних елементів лопаток.

1.2 Традиційний спосіб виготовлення компресорних лопаток

Заготовки компресорних лопаток на більшості машинобудівних заводів зазвичай виготовляють за такою технологічною схемою (рис. 1.3):

- отримання вихідної заготовки у вигляді стрижня з потовщенням на кінці механічним обточуванням або ковальською висадкою;
- облойне штампування за кілька переходів;
- обрізання облою;
- правка або калібрування [4].



a - вихідний пруток; *б*- заготовка після висаджування на ГКМ; *в* - заготовка після попереднього штампування; *г* - заготовка після калібрування

Рисунок 1.3 – Технологічні переходи при штампуванні заготовки лопатки

Така технологія виготовлення не забезпечує отримання якісних заготовок за структурою, чистотою поверхні і вимогам продуктивності обладнання з наступних причин [4]:

- в процесі висаджування деформується тільки частина стрижня, а основний об'єм металу піддається нагріванню без подальшої деформації;
- стрижень висадженої заготовки циліндричної форми не забезпечує рівномірної деформації при подальшому штампуванні лопаток;
- велика трудомісткість ковальських операцій і подальшої механічної обробки;

- низький коефіцієнт використання металу при підготовці вихідної заготовки під висаджування через великі припуски на механічну обробку і відхід в облой.

Однак, автори [5] вказують і на перевагу висадки заготовок на ГKM, що дозволило успішно конкурувати з отриманням фасонних заготовок, наприклад на кувальних вальцях. При цьому отримання фасонних заготовок висаджуванням на ГKM в 3...4 рази продуктивніше вальцювання. Висаджуванням на ГKM автори рекомендують отримувати заготовки для лопаток з постійним або незначною зміною поперечного перерізу по довжині пера лопатки, що вимагають більше чотирьох проходів на кувальних вальцях, а також при недостатній довжині заготовки для затискання її в маніпуляторі кувальних вальців. Однак для отримання якісних фасонних заготовок необхідна стабільність нагрівання в межах $\pm 20^{\circ}\text{C}$.

1.3 Приклад технологічного процесу виготовлення заготовки компресорної лопатки

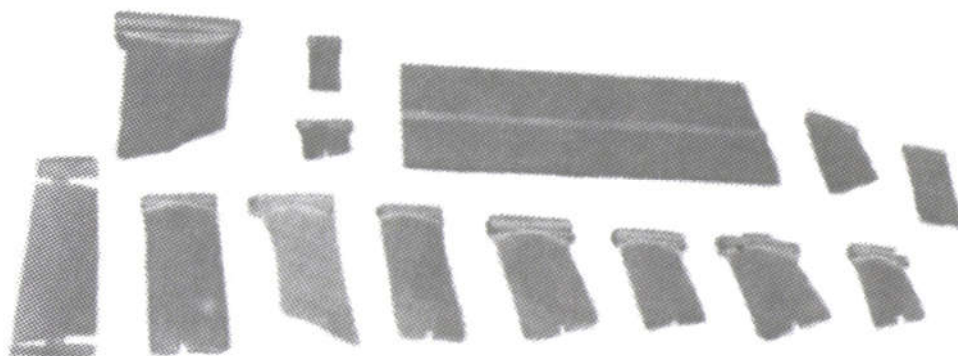
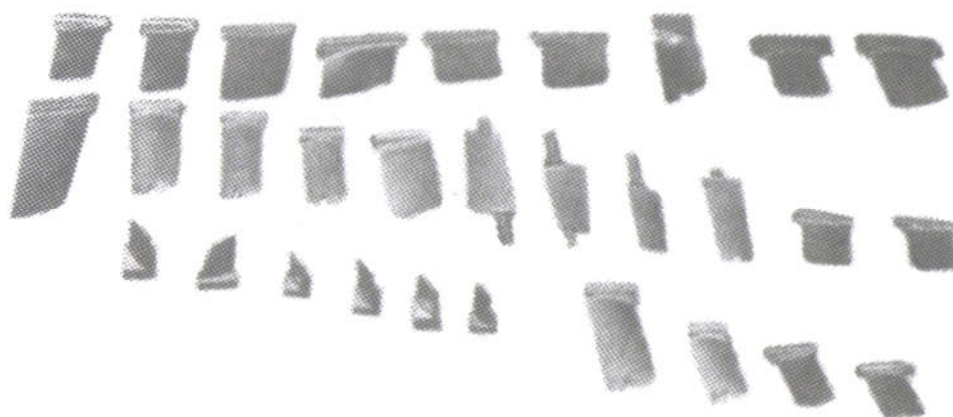
Одним з прогресивних, економічних і продуктивних варіантів технології виготовлення пера лопаток компресора з титанових сплавів BT8, BT3-1, сталей мартенситного класу 14X17H2, X12HMBФ, 15X16H2M, жароміцних сталей і сплавів ХН45МВТЮБР і ХН77ТЮР є їхнє формоутворення за такою технологічною схемою (рис. 1.4) [1]:

- вихідна заготовка - пруток;
- групова заготовка - періодичний прокат;
- вирубка індивідуальної заготовки;
- точне штампування (рис. 1.5);
- обрізання облою;
- калібрування;

- термічна обробка;
- видалення поверхневого дефектного шару;
- холодне вальцювання (рис. 1.6, 1.7);
- фінішна обробка, що включає зміцнюючі технології методами поверхневого пластичного деформування.



Рисунок 1.4 – Послідовність технологічних переходів точного штампування робочих лопаток компресора із прутка

*a**b*

a – вихідна заготовка – періодичний прокат; *b* – вихідна заготовка, отримана видавлюванням

Рисунок 1.5 – Заготовки лопаток, які виготовляються точним штампуванням

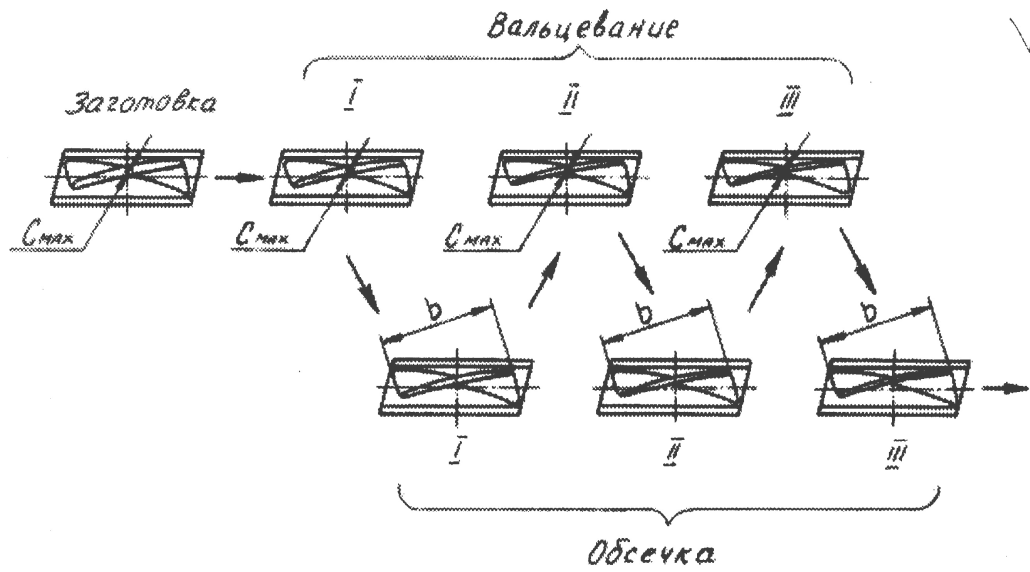


Рисунок 1.6 – Послідовність технологічних переходів вальцювання пера лопатки

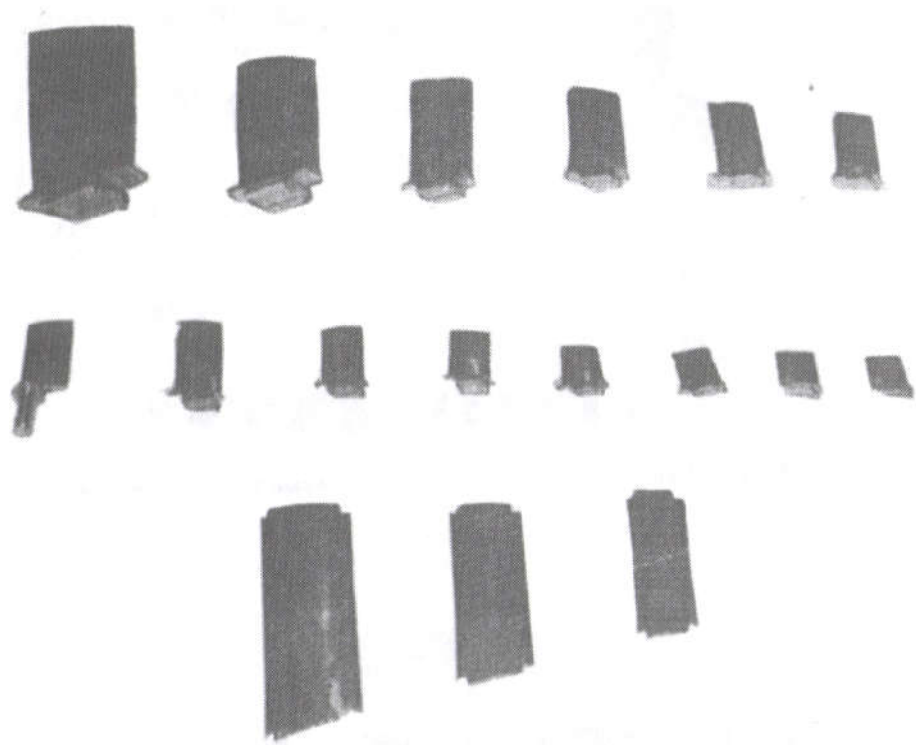
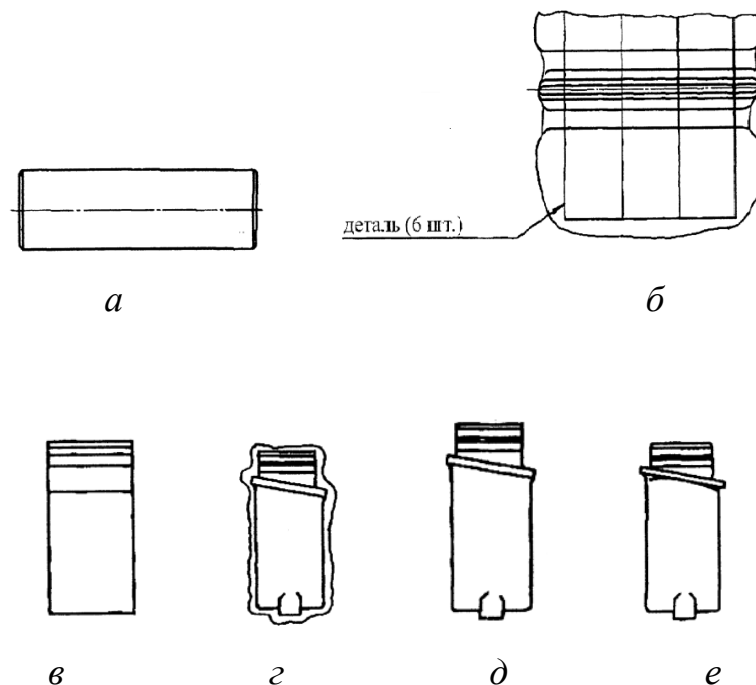


Рисунок 1.7 – Номенклатура лопаток двигуна Д-36, які виготовляються вальцюванням

У процесі формоутворення пера лопаток методами пластичного деформування важливим завданням є забезпечення точності геометричних розмірів пера і параметрів його поверхневого шару, оскільки вони в умовах експлуатації двигуна зумовлюють ресурс і надійність деталей і виробу в цілому [2].

1.4 Спосіб отримання заготовок компресорних лопаток методом точного штампування

Найбільш поширеним в даний час способом отримання заготовок лопаток є точне штампування (рис. 1.8). [6]



a – вихідна заготовка; *б* – групова заготовка на 6 деталей; *в* – індивідуальна заготовка; *г* – штамповка лопатки; *д* – обрізання облою; *е* – калібрування

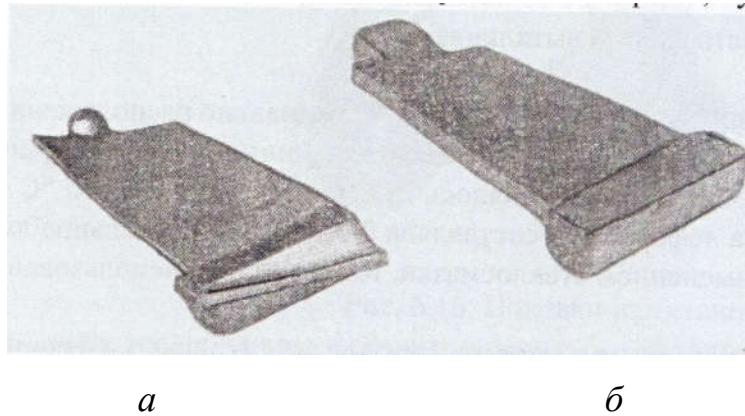
Рисунок 1.8 – Послідовність переходів технології точного штампування

Точними прийнято називати заготовки, отримані методом гарячої деформації з припуском $0,05 \dots 0,5$ мм на сторону по робочій частині лопатки. Технологічний процес точного штампування складається з наступних основних операцій: різання шліфованих заготовок, гаряче вальцювання, штампування перше, обрізання облою, штампування друге, обрізання облою, калібрування-чеканення. Перед кожною штампувальною операцією заготовки покриваються скломастилом. Штампування здійснюється на КГШП зусиллям 16, 25, 40 і 63 МН. Це обладнання не підходить для штампування лопаток з малими припусками через пружну деформацію преса, яка складає $6 \dots 10$ мм, складним є питання створення високостійких штампів [7]. При точному штампуванні норма витрати матеріалу скорочується майже в два рази. Впроваджені у виробництво процеси свідчать про їхню рентабельність.

Зазначені вище недоліки вдалося в деякій мірі усунути застосуванням для точного штампування фрикційних і гідрогвинтових прес-молотів і штампів напруженої конструкції.

1.5 Спосіб отримання заготовок компресорних лопаток ізотермічним штампуванням

За останні кілька років отримує раціональне застосування ізотермічне штампування лопаток компресора з титанових сплавів і конструкційних сталей, а також для отримання профільних заготовок під подальше деформування. Ізотермічне штампування усуває деякі недоліки звичайного штампування тим, що зменшує зусилля деформування, підвищує пластичність оброблюваних матеріалів, рівномірність деформації і культуру виробництва в ковальському цеху [8] (рис. 1.9).



a – заготовка виготовлена ізотермічним штампуванням; *б* – заготовка виготовлена звичайним штампуванням

Рисунок 1.9 - Поковки лопаток зі сплаву VT3-1

Процес деформування в ізотермічних умовах полягає в тому, що в заготовці, інструменті і оточуючому середовищі створюється і постійно підтримується температура, необхідна для деформування оброблюваного металу. Так як деформування здійснюється при малих швидкостях, то знеміцнюючі процеси (повернення і рекристалізація) встигають протікати в ході самої деформації, що підвищує технологічну пластичність сплаву і різко знижує опір пластичного деформування.

Основні технологічні переваги методу полягають в наступному:

- підвищення пластичності оброблюваного металу;
- зменшення зусиль деформування;
- можливість деформування в умовах статичного навантаження;
- можливість отримання точних заготовок з високими коефіцієнтами використання металу;
- можливість знизити температуру нагрівання.

Метод деформування в ізотермічних умовах освоєний при точному штампуванні лопаток компресора з титанових сплавів і сталей з припуском по перу 0,2...0,4 мм на сторону. Штампування здійснюється за 2...3 переходи, причому перші переходи можуть проводитися на гідروгвинтових

прес-молотах. Фасонування заготовок перед штампуванням проводиться висаджуванням на горизонтально-кувальних машинах, або електровисадочних автоматах, або видавлюванням, в тому числі в ізотермічних умовах [8].

Незважаючи на зазначені переваги, процес ізотермічного штампування має і недоліки, які полягають в тому, що продуктивність і стійкість штампів порівняно низькі і трудомісткість процесу вище, ніж при звичайному штампуванні [8].

1.6 Високошвидкісне об'ємне штампування заготовок компресорних лопаток

Поряд з ізотермічним штампуванням знаходить поширення точне штампування лопаток високошвидкісним об'ємним деформуванням. Поширення високошвидкісного штампування стало можливим завдяки низці переваг: інерційні сили створюють сприятливу схему напруженого стану (підвищення гідростатичного тиску), що підвищує пластичність металу і покращує заповнення глибоких порожнин [5].

Сутність високошвидкісного об'ємного штампування полягає в пластичній формозміні металу при прикладенні деформуючого зусилля інструменту, що рухається зі швидкістю близько декількох десятків метрів в секунду. Високі швидкості деформування і, як наслідок, поява значних інерційних сил на першій стадії процесу створюють більш сприятливі схеми напруженого стану (підвищення гідравлічного тиску), що трохи підвищує пластичні властивості металу, а в кінцевій стадії процесу сприяють заповненню важкодоступних місць формоутворюючої порожнини інструменту.

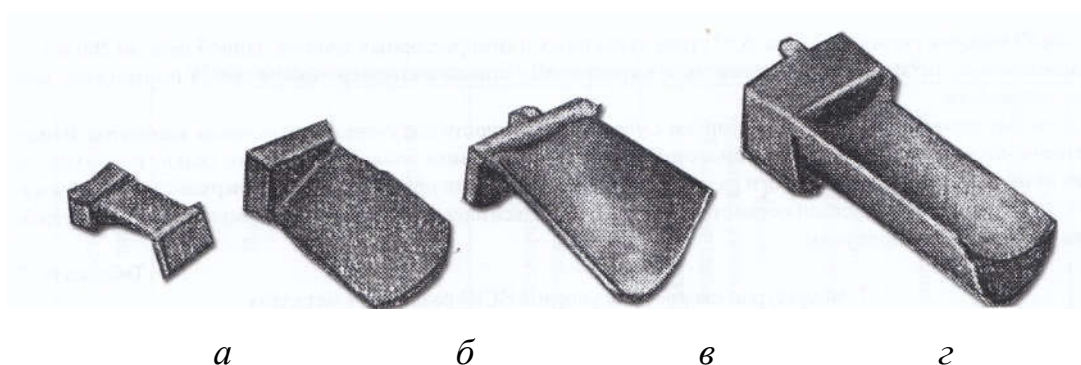
До основних переваг методу стосовно виробництва лопаток можна віднести:

- поліпшення заповнення глибоких порожнин штампів;
- можливість виготовлення складних деталей з тонкими кромками;
- можливість отримання на деталях малих радіусів ($0,5 \dots 2 \text{ мм}$) і штампувальних нахилів ($30' \dots 1^\circ$).

Недоліками методу слід вважати обмежену номенклатуру виготовлення заготовок лопаток (тільки однополичні лопатки) і підвищені вимоги до зносостійкості штампів.

Процес високошвидкісного видавлювання забезпечує виготовлення штамповок компресорних лопаток без припуску по перу на механічну обробку. Величина допуску повинна визначатися точністю виготовлення формоутворюючого оснащення і його стійкістю до зношування.

При високошвидкісному штампуванні основна частина економії утворюється за рахунок збільшення коефіцієнта використання металу і зниження трудоемності виготовлення лопаток [8]. На рис. 1.10 зображено заготовки лопаток, отримані високошвидкісним штампуванням.

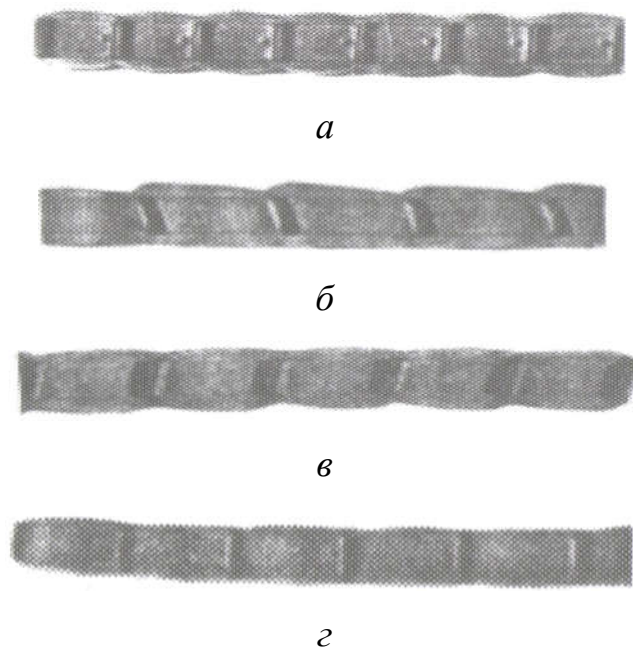


a – двохвостовикова; *б, в* – із закрученим пером із припуском $0,3 \text{ мм}$; *г* – з прямим пером

Рисунок 1.10 - Заготовки лопаток, отримані високошвидкісним видавлюванням

1.7 Спосіб отримання заготовок компресорних лопаток поздовжнім періодичним прокатуванням

Одним з напрямків у виробництві турбінних та компресорних лопаток є поздовжнє періодичне прокатування (рис. 1.11). [9]



a – з прямим хвостовиком зі сталі 1X17H2; *б* – з косим хвостовиком зі сталі 1X16H2AM; *в* – з косим хвостовиком зі сталі 1X17H2; *г* – з прямим хвостовиком із титанового сплаву BT8

Рисунок 1.11 – Полоси періодичного прокату заготовок робочих лопаток компресора під точну штамповку

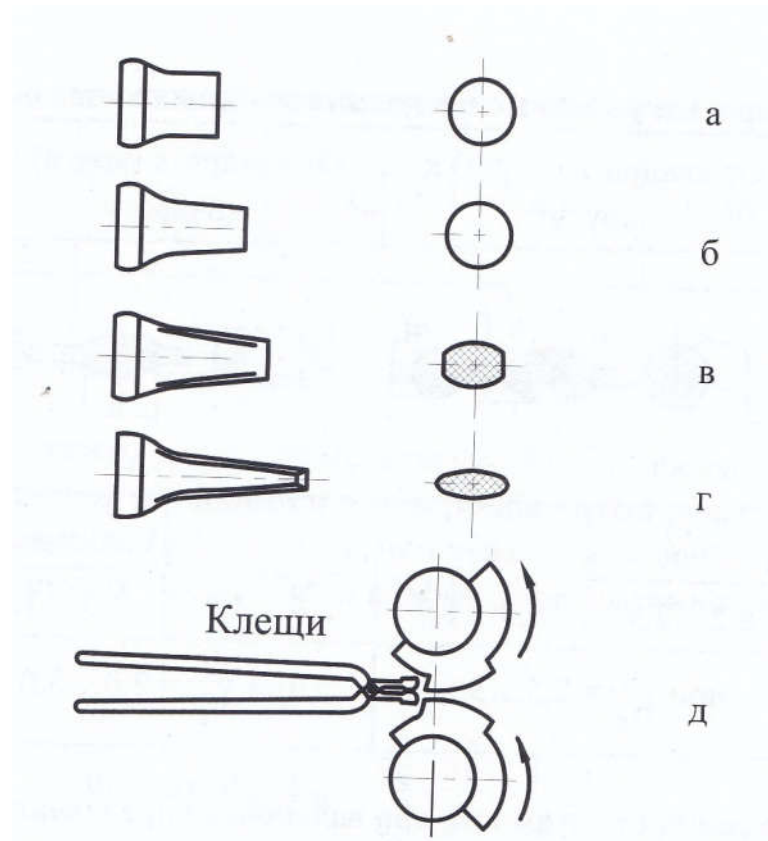
Авторами [8] були прокатані заготовки з одностороннім періодом для штампування лопаток. Така заготовка зменшить витрату сплаву, збільшить продуктивність праці і поліпшить якість лопаток за рахунок структурної неоднорідності матеріалу по волокну.

1.8 Спосіб отримання заготовок компресорних лопаток вальцюванням

При отриманні заготовок турбінних лопаток методом вальцювання в порівнянні зі штампуванням КВМ підвищується з 0,2 до 0,5, зменшується трудоемність на 25% [10].

Великого поширення набуло гаряче вальцювання: заготовки компресорних лопаток із неіржавіючої сталі виготовляють гарячим вальцюванням пера на ковальських вальцях із заготовки, отриманої видавлюванням фасонної заготовки із круглою і штампуванням на механічному пресі або молоті (рис. 1.12).

Описані способи отримання заготовок лопаток, складовою частиною яких є гаряче вальцювання, перспективні і знайшли широке застосування через цілу низку переваг. Гаряче вальцювання дозволяє замінити потужні штампувальні молоти і преси ковальськими вальцями. Вальцюванням можна виготовити точні заготовки лопаток великих розмірів, отримати високий коефіцієнт використання металу, хороші механічні властивості заготовок і ін. Однак у випадку, коли заготовки мають незначну зміну поперечного перерізу по довжині пера, недостатню довжину для затискання її в маніпуляторі ковальських вальців, а також великі перепади поперечних перерізів по довжині пера лопатки, що вимагають більше чотирьох проходів на ковальських вальцях, застосування гарячого вальцювання виявляється не вигідним [8].



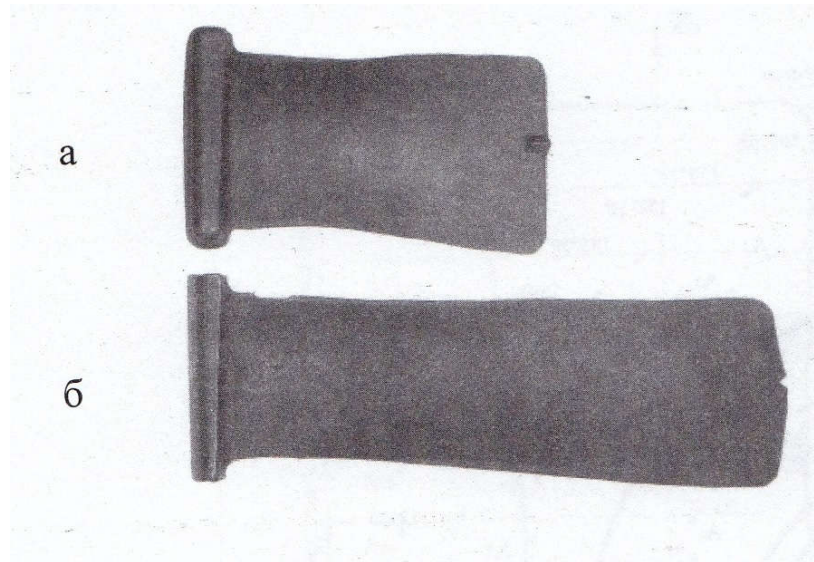
a – висаджена заготовка; *б* – перша операція (два проходи із поворотом на 90°); *в* – друга операція; *г* – третя операція; *д* – четверта операція

Рисунок 1.12 - Схема обробки заготовки лопатки на ковальських вальцях за схемою: круг – ящичний калібр - овал

Поряд з гарячим вальцюванням останнім часом широкого поширення набуло холодне вальцювання, що використовується для чистової обробки пера лопаток.

Холодне вальцювання відрізняють як здешевлюючий процес обробки лопаток, що гарантує високу степінь точності, хорошу чистоту поверхні, близьку до каліброваної і економічність внаслідок відсутності відходу металу. На процес вальцювання не впливає допуск на товщину лопатки і розмірна точність, властиві зазвичай точному штампуванню.

На рис. 1.13 зображено заготовку компресорної лопатки після вальцювання.



a – заготовка після штампування; *б* – заготовка після вальцювання

Рисунок 1.13 - заготовка компресорної лопатки після вальцювання

1.9 Виготовлення лопатки компресора фрезеруванням

Представлено спосіб фрезерування пера на п'ятикоординатному верстаті з числовим програмним управлінням. Обертаючі фрези передають переміщення і періодичну подачу на строчку уздовж осі заготовки лопатки у вигляді паралелепіпеда, яку повертають щодо фрези. Заготовку затискають в розміщеному на горизонтальному столі верстата пристосуванні вертикально до столу. Підводять до вихідної точки контакту співоброблювану з поверхнею лопатки і здійснюють фрезерування з наданням готової форми хвостовика і попереднім фрезеруванням елементів лопатки за п'ять переходів за допомогою її циліндричної торцевої і периферійної частини. Потім базують заготовку вертикально щодо горизонтального столу верстата по поверхні хвостової частини, видаляють технологічний прибуток, обробляють заготовку з наданням готової форми пера, або пера з додатковими конструктивними елементами лопатки за допомогою конусної фрези щонайменше за один перехід при обробці пера лопатки з відхиленням осі

фрези від нормалі до оброблюваної поверхні в площині напрямку подачі фрези і в перпендикулярній їй площині, або за допомогою конусної і циліндричної фрези щонайменше за два переходи при обробці лопатки з додатковими конструктивними елементами (рис.1.14 - 1.21). [11]

На поданих рисунках зображено:

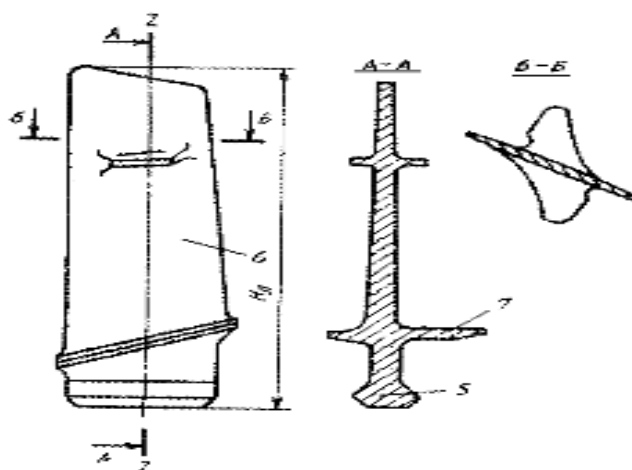
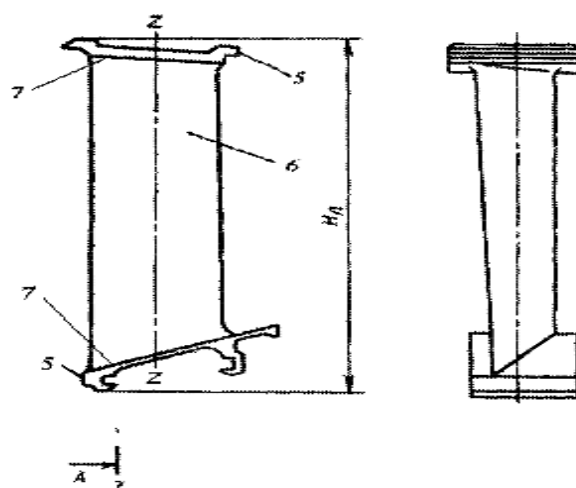
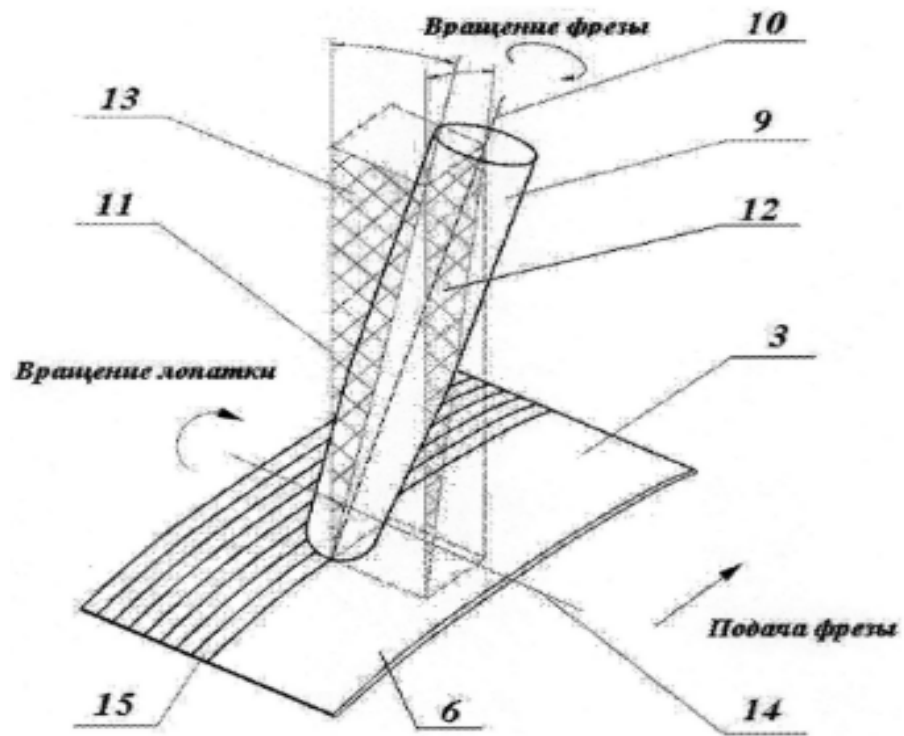


Рисунок 1.14 - Конструкція компресорної лопатки із додатковим конструктивним елементом



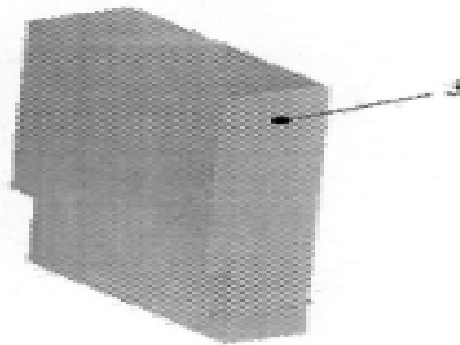
5 – хвостовик; 6 – перо лопатки; 7 – проточна поверхня

Рисунок 1.15 - Конструкція компресорної лопатки з додатковим конструктивним елементом у вигляді додаткового хвостовика



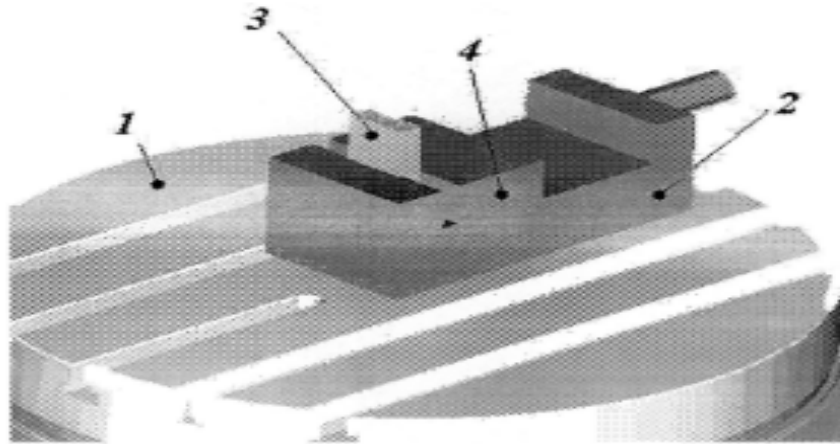
3 – заготовка; 6 – лопатка; 9 – конусна фреза; 10 – вісь фрези; 11 – нормаль; 12 – площина; 13 – площина; 14 – вісь; 15 – строчка

Рисунок 1.16 - Схема взаємодії фрези із заготовкою компресорної лопатки при вертикальному закріпленні



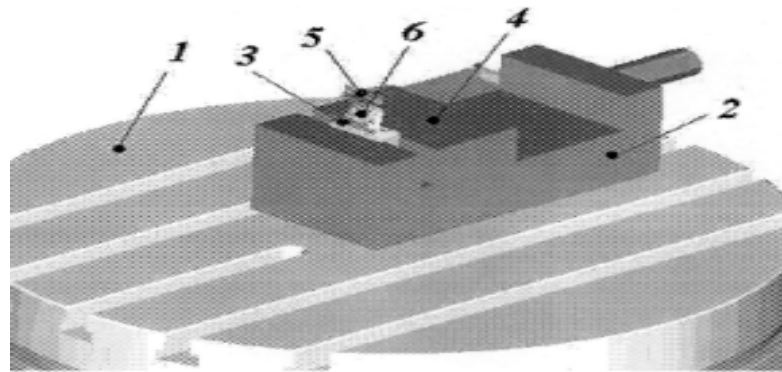
3 – заготовка

Рисунок 1.17 - Об'ємна модель заготовки компресорної лопатки у вигляді паралелепіпеда з виступом



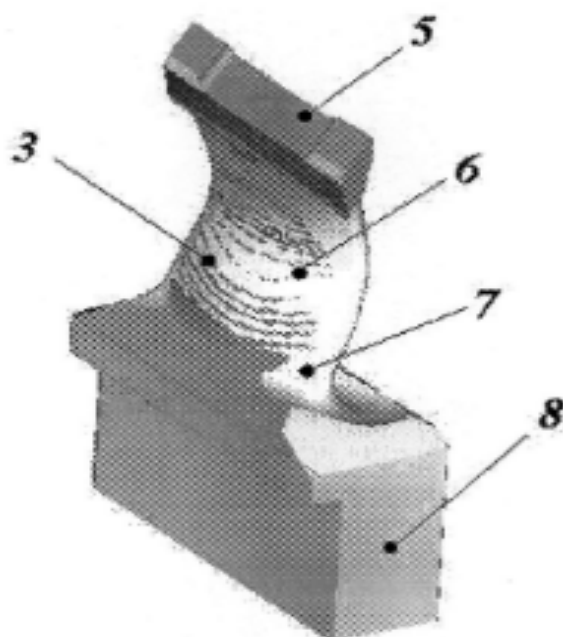
1 – стіл; 2 – пристосування; 3 – заготовка; 4 – затискач

Рисунок 1.18 - Об'ємна модель заготовки компресорної лопатки в пристосуванні перед обробкою



1 – стіл; 2 – пристосування; 3 – заготовка; 4 – затискач; 5 – хвостовик;
6 – компресор

Рисунок 1.19 - Об'ємна модель заготовки компресорної лопатки в пристосуванні після фрезерування хвостовика і попереднього фрезерування пера



3 – заготовка; 5 – хвостовик; 6, 7 – компресори; 8 – технологічний
прибуток

Рисунок 1.20 - Об'ємна модель заготовки компресорної лопатки після
фрезерування хвостовика і попереднього фрезерування пера

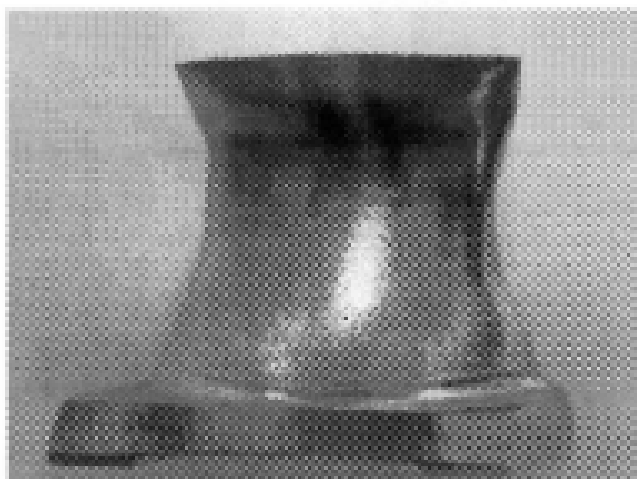


Рисунок 1.21 - Зовнішній вигляд компресорної лопатки виготовленої
запропонованим способом

Розроблений спосіб виготовлення відрізняється простотою і технологічною ефективністю. Технологічні випробування підтвердили, що:

- спосіб дозволяє підвищити точність розмірів і чистоту поверхні обробленого профілю компресорної лопатки;

- дозволяє значно зменшити трудомісткість виготовлення компресорної лопатки за рахунок виключення проміжних операцій, включаючи шліфування лопатки і подальше ручне доведення, і тим самим істотно скоротити кількість браку при виготовленні.

- спосіб дозволяє здійснити високопродуктивне фрезерування компресорної лопатки з незначним часом на установку (базування) і затиск заготовки.[11]

1.10 Особливості технології обробки компресорних лопаток турбореактивних двигунів

У статті [12] розглянуто три етапи розробки технологічного процесу обробки лопатки.

Перший етап - застосування *CAD/CAM*-системи для розробки електронної тривимірної моделі деталі заготовки та технологічного оснащення. Для компресорної лопатки основними базовими елементами є: вісь компресора, вісь лопатки, поверхні робочого каналу трактові поверхні, геометрія зон елементів кріплення лопатки.

Другий етап - підбір ріжучого і допоміжного інструменту, розробка керуючих програм для станка ЧПУ і їх верифікація на комп'ютері на відсутність зіткнень рухомих частин верстата і ріжучого інструменту зі верстатним оснащенням і заготовкою, використовуючи спеціалізовані програми, такі як, наприклад. *VERICUT*. Особливість даного типу інструменту - це змінні ріжучі головки. Головка кріпиться різьбовими

з'єднаннями, швидко і зручно замінюється безпосередньо на верстаті без витрат часу на налагодження. Застосування змінних головок дозволяє значно знизити витрати. При обробці було відзначено зниження навантаження на шпинделі, а також помітно скоротився час обробки приблизно в 1,5 рази в порівнянні з класичною фрезою.

У статті [12] центрувальний отвір і обробку лопатки розглядали на верстаті MIKRON UCP 600 Vario Torgue (рис. 1.22).



Рисунок 1.22 - Станок *MIKRON UCP 600 Vario Torgue*

Третій етап - виконання обробки лопатки на верстаті за отриманими керуючими програмами. Цей етап включає також оптимізацію режимів різання і при необхідності керуючих програм. Для розробки керуючих програм використовується спеціалізований програмний модуль, написаний

для CAD-системи *Unigraphics NX*. Це дозволило забезпечити високу точність обробленої лопатки.

Для обробки застосовувався ріжучий інструмент фірми *ISCAR*. Чорнова обробка велася торцевими радіусними фрезами серії *MULTI-MASTER* (рис. 1.23).



Рисунок 1.23 - Ріжучий інструмент серії *Multi Master* фірми *ISCAR*

1.11 Проектування технологічного процесу виготовлення лопаток з полімерних композиційних матеріалів

Лопатки з ПКМ можуть представляти суцільну конструкцію (рис. 1.24-1.25), що виготовляється за один прийом, або комбіновану конструкцію - перо з ПКМ, полки лопатки металеві. При дії високих контактних навантажень на перо лопатки кріпляться металеві фольгові накладки. У конструкції лопатки передбачений захист кромки і поверхні від ударного і ерозійного впливу. [13]

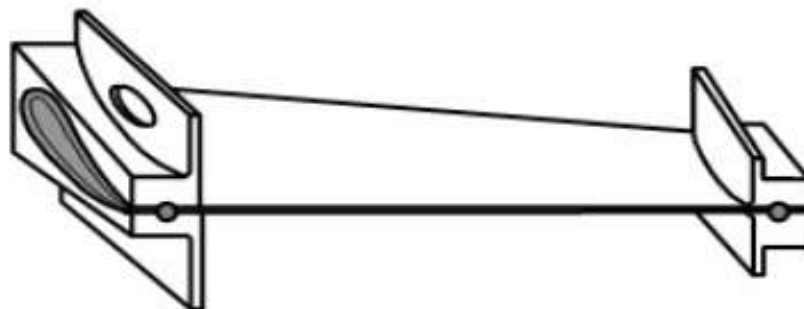
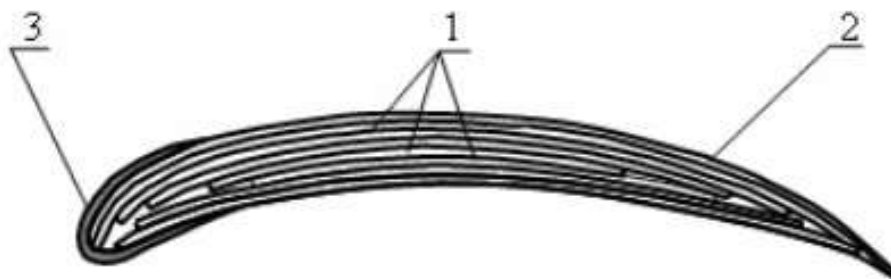


Рисунок 1.24 - Конструкція з'єднання пера лопатки із ПКМ із полками



1 – внутрішні шари; 2 – зовнішній шар; 3 – металева оковка

Рисунок 1.25 - Лопатка виконана із окремих шарів

Шари матеріалу типу тканин, фольги, сіток в зоні кромки укладаються таким чином, щоб вони не виходили назовні, а обминали кромку. Лопатка виконується складанням окремих шарів матеріалу зі спинки до корита від великих шарів до менших і знову до більших шарів.

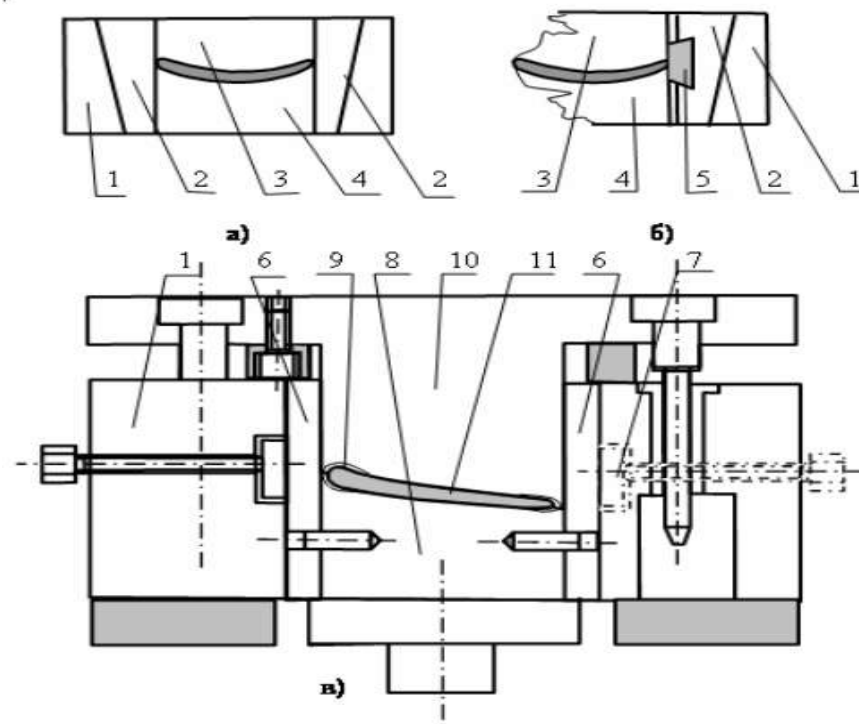
Вхідна кромка лопатки захищається металевою оковкою. Для збільшення міцності на міжшарових зрушеннях вихідну кромку можна прошити органонитками, склонитками, металевими скобами. Вихідна кромка захищена накладкою з металевої сітки.

Лопатка із замкнутою структурою виконується навиванням матеріалу, що представляє собою пошарову розгортку лопатки, від зовнішніх контурів до центру. Навивання здійснюється від першого внутрішнього шару до

зовнішнього. Для забезпечення замкнутості шарів матеріалу розгортка виконується із шаруватих матеріалів типу тканин, фольги і т.п. При розкрої матеріалу розгортка шарів вирізається під певним (настановним) кутом, що забезпечує врівноважену і симетричну структуру.

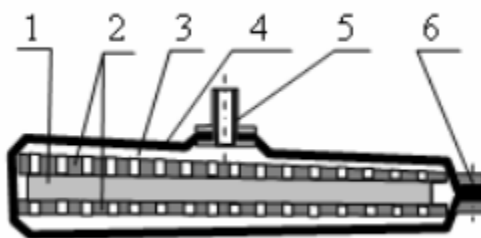
Замкнена структура матеріалу лопатки з ПКМ забезпечує підвищення міцності конструкції на міжшарових зрушеннях і вигинах, жорсткості і втомної міцності, стійкості крайок до удару.

Представлені принципові конструкції прес-форм для безоблойного формування лопаток (рис. 1.26 – 1.27). Елементи пресформ, які оформлюють кромки лопатки, виконуються знімними, що забезпечує вільне витягування відпресованих лопаток.



а – клинова; *б* – з пружним елементом; *в* – з технологічними накладками; 1 – обойма; 2 – клини; 3, 4 – оформлюючі знаки; 5 – ущільнюючі елементи; 6 – щоки; 7 – гвинти; 8 – матриця; 9 – технологічна накладка; 10 – пуансон; 11 – лопатка

Рисунок 1.26 - Прес-форма для формування лопаток



1 – лопатка; 2 – цулаг; 3 – дренажный шар; 4 – эластичный мешок; 5 – штуцер; 6 – затискач.

Рисунок 1.27 - Пристрій для попереднього формування заготовки лопатки

Процес виготовлення лопаток включає наступні основні операції (рис. 1.28)

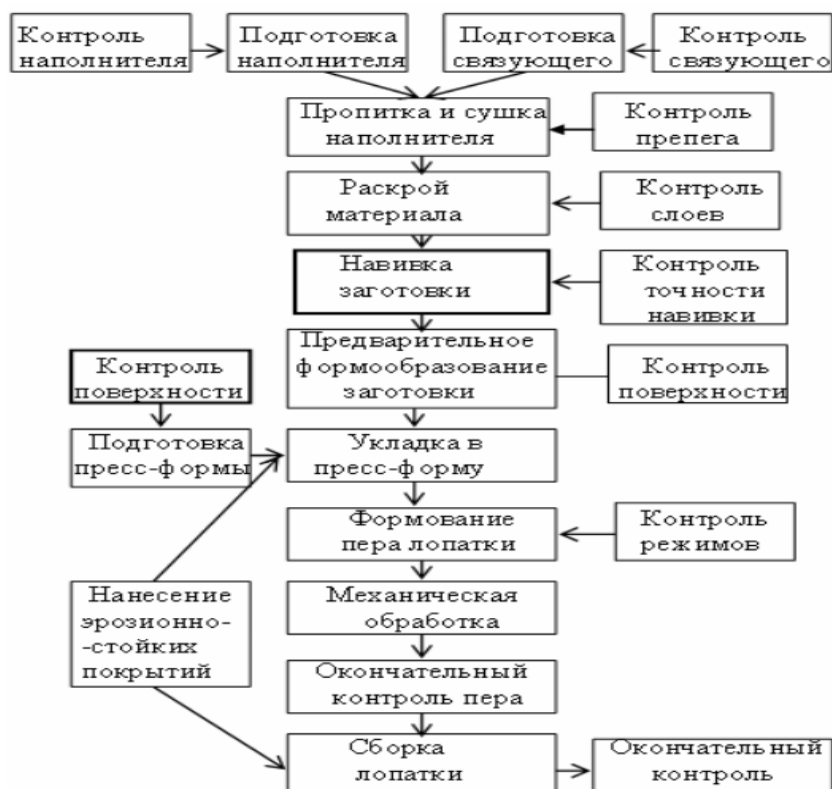


Рисунок 1.28 - Схема технологічного процесу виготовлення лопаток ПМК методом прямого пресування.

Збірка лопатки полягає в з'єднанні пера лопатки з металевією арматурою (полками). Зони пера, що йдуть під закладення, зачищаються шкіркою та знежирюються. Поверхні просічок в металевій арматурі також знежирюються.[14]

1.12 Перспективний технологічний процес виготовлення прецизійних компресорних лопаток

На основі аналізу технологічних процесів виготовлення прецизійних лопаток представлений варіант технології, в якому виключена механічна обробка пера лопаток.

В роботі [15] проведено аналіз існуючих технологій виготовлення прецизійних лопаток, аналіз існуючих систем базування лопаток в процесі виготовлення, аналіз способів контролю геометричних параметрів пера лопаток.

В даний час перо лопаток виготовляються фрезеруванням, вальцюванням і за допомогою електрохімічної обробки.

В результаті вальцювання пера лопатки відбувається деяке зміцнення поверхні. Крім того, цей процес є високопродуктивним, після нього не потрібна механічна обробка зі зняттям стружки. Фрезерування лопаток на верстатах з програмним управлінням дозволяє отримувати лопатки з точністю близько 0,1 мм.

При виготовленні лопаток одним з найбільш важливих питань є вибір оптимальної системи базування. Розглянуто системи базування, що застосовуються в процесі виготовлення лопаток.

1. Система базування лопаток в процесі виготовлення, застосована в ВАТ «УМПО», призначена для лопаток компресора з хвостовиком типу

«ластівчин хвіст», (рис.1.29). Вона заснована на принципі поєднання конструкторських і технологічних баз.

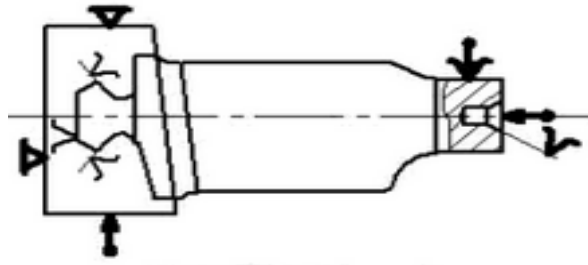


Рисунок 1.29 - Підприємство ВАТ «УМПО»

2. Система базування застосовується на підприємстві ВАТ «НВО«Сатурн »(м. Рибінськ), заснована на принципі сталості баз (рис. 1.30). На першому етапі виготовлення лопаток отримують технологічні допоміжні бази (наприклад, центрові отвори)

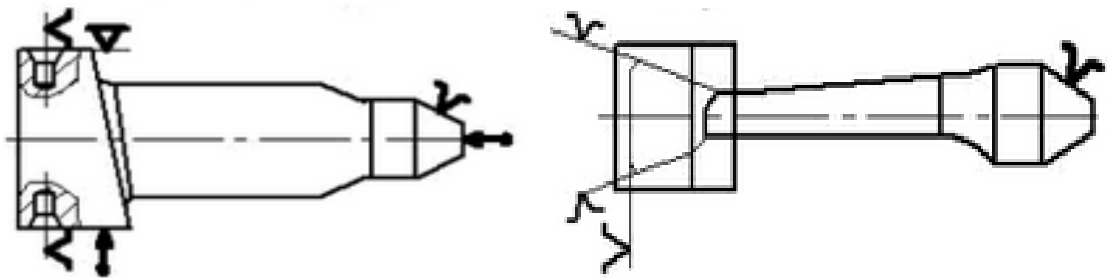


Рисунок 1.30 - Підприємство ВАТ «Сатурн»

3. Система базування, що застосовується в процесі виготовлення лопаток за запропонованою технологією (рис.1.31). В першу чергу отримують технологічні допоміжні бази (призматичні). З цією метою

штампувальну заготовку попередньо центрують, після чого роблять обробку граней хвостовика.

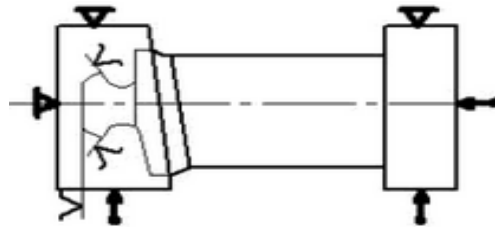


Рисунок 1.31 - За попередньою технологією

4. За технологією, яка застосовується на підприємстві Leistriz (Німеччина), заготовкою лопатки є штампування (рис.1.32). На першому етапі виготовлення проводиться обробка масивної бобишки, по якій відбувається базування заготовки на наступних операціях. Профіль пера отримують методом ЕХО (електрохімічна обробка).

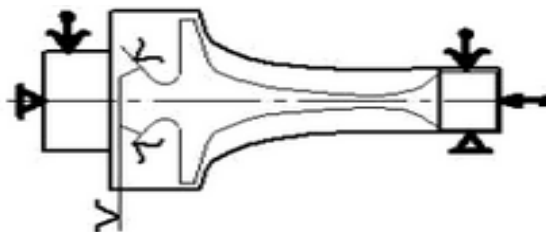


Рисунок 1.32 - Підприємство Leistriz (Німеччина)

У розробленому технологічному процесі обробка пера і прикомлевої ділянки здійснюється методом електрохімічної обробки з подальшим електролітно-плазмовим поліруванням, іонноплазменним зміцненням, і при необхідності, нанесення ерозійностійких покриттів (рис. 1.33).

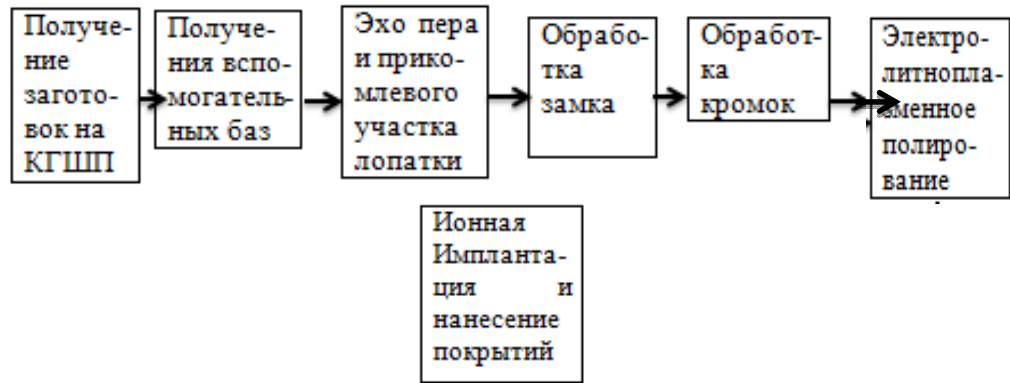


Рисунок 1.33 - Розробляється технологія виготовлення лопаток

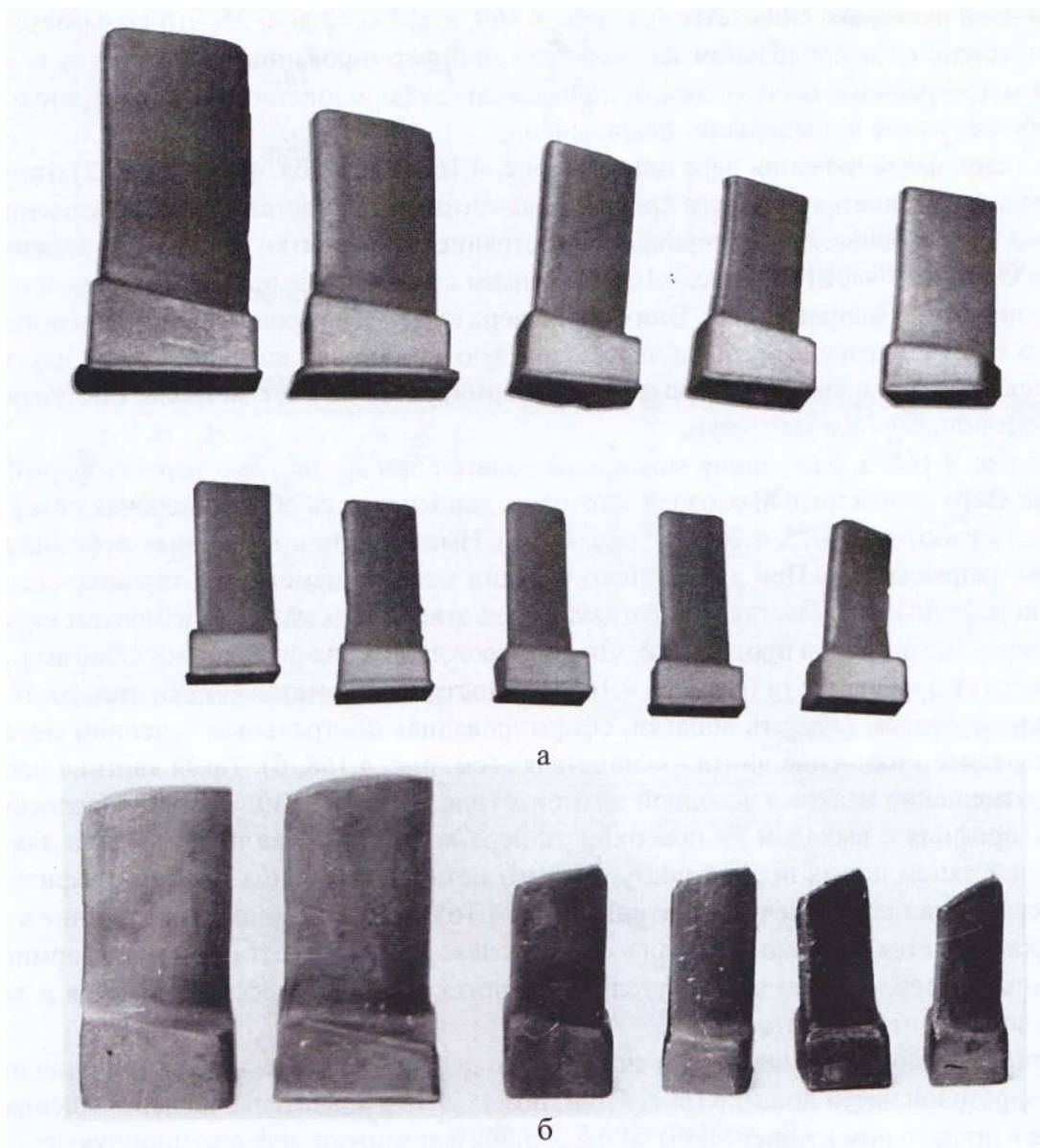
Застосування прецизійної електрохімічної обробки для обробки пера і ділянки лопаток дозволить досягти необхідну точність деталей, а також виключити з технологічного процесу слюсарно-полірувальні операції. Метод гарантує отримання деталей із заданою точністю, якістю поверхні і експлуатаційними характеристиками.

1.13 Спосіб отримання заготовок компресорних лопаток видавлюванням

Метод гарячого видавлювання заготовок лопаток компресора дозволяє усунути вищезгадані недоліки і отримати якісні заготовки, при цьому значно підвищується якість деталей завдяки сприятливому поєднанню структури і механічних властивостей і зниження трудомісткості виготовлення лопаток [8]. Цей метод рекомендується при великому співвідношенні площ замкової і перової частини лопаток [5].

Методом видавлювання виготовляються заготовки робочих лопаток компресора зі сталі ЕП-479 під вальцювання. З вихідної заготовки круглого або прямокутного перерізу в роз'ємних штампах на ексцентриковому пресі

видавлюють перо з припуском $0,2 \dots 0,1$ мм на сторону і додатнім допуском $0,6 \dots 0,7$ мм (рис. 1.34).



а – заготовки зі сталі ЕП-479; *б* – заготовки із титанового сплаву ВТ-8

Рисунок 1.34 - Заготовки лопаток компресора, отримані видавлюванням

При видавлюванні попередньої заготовки з титанових сплавів, останні налипають на поверхню інструменту, внаслідок чого на поверхні деталі з'являються риси, вм'ятини і задирки [16].

Видавлювання є операцією отримання попередніх фасонних заготовок у багатьох процесах отримання лопаток ГТД, так як має ряд переваг в порівнянні з іншими процесами: дозволяє збільшити коефіцієнт використання металу, зменшити трудовитрати і поліпшити механічні властивості заготовок. Видавлювання заготовок лопаток довжиною до 100 мм за приведеними витратами, зумовленими виготовленням однієї лопатки, найбільш економічно [17]. Однак цей процес є важким і менш відпрацьованим особливо при видавлюванні високолегованих жароміцних сплавів і не виходить за рамки експерименту, а при видавлюванні заготовок з титанових сплавів отримують невисоку якість поверхні і різку неоднорідність структури по довжині і перерізу виробу. Найбільш вразливим місцем цього способу є недостатня стійкість інструменту [8].

На ряді заводів освоєний процес ізотермічного видавлювання заготовок лопаток з титанових сплавів. Видавлювання в ізотермічних умовах виявляється досить ефективним з точки зору підвищення якості і точності одержуваних заготовок і характеризується однорідною структурою. В даний час цей процес застосовується тільки для лопаток з титанових сплавів [8].

Останнім часом видавлювання заготовок компресорних лопаток стали проводити на високошвидкісному обладнанні [5]. Досвід деяких заводів показав ряд переваг високошвидкісного видавлювання в порівнянні зі звичайним при виготовленні точних заготовок лопаток. Коефіцієнт використання металу підвищується до 0,7 і знижується трудомісткість виготовлення лопаток до 40%. Незважаючи на його переваги цей метод тільки знаходить своє застосування через недоліки властивих видавлюванню (невисока стійкість інструменту, дефекти поверхні, налипання металу на інструмент і ін.) [8].

1.14 Особливості процесів формоутворення заготовок лопаток з титанового сплаву системи Ti-TiВп

Метою роботи є дослідження особливості формоутворення заготовок лопаток з титанового сплаву системи Ti-TiВп в процесі ізотермічного пресування (рис. 1.35).

У статті [18] розглядався вплив температури деформації на якість поверхні заготовки, вплив товщини мідного покриття, вплив виду мастила на процес видавлювання, вплив матеріалу матриці, дослідження особливостей формування структури матеріалу при пластичному деформуванні.

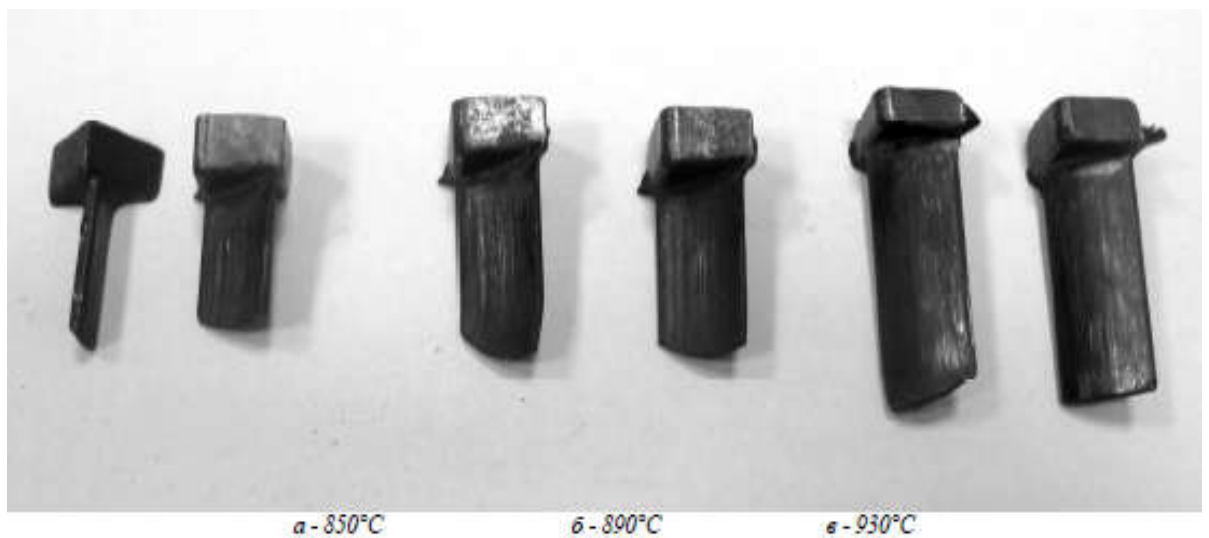


Рисунок 1.35 - Заготовки лопаток відпресовані при різних температурах

Площину зразка умовно можна розділити на наступні зони (рис.1.36), в залежності від характеру плинину металу при пресуванні:

I - зона, стикається з пуансоном. Матеріал цієї зони внаслідок значних сил тертя, практично не деформується;

II - зона інтенсивного плинину металу в порожнину пера лопатки. Максимальні лінії плинину є причетними до обвідної зони I і радіусів галтелей;

III - зона сталого плинину, де матеріал заповнює порожнину пера лопатки постійного поперечного перерізу;

IV - зона, що характеризується умовами гальмування плинину металу.

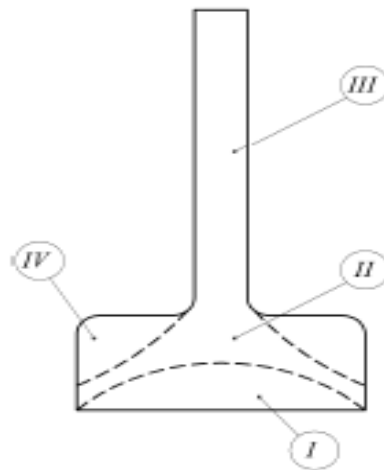


Рисунок 1.36 - Характерні зони поперечного перерізу зразка лопатки, що виникають при ізотермічному пресуванні

Висновки

Таким чином, підготовка виробництва лопаток ГТД та її ефективність займають одне з найважливіших місць в організації виробництва газотурбінних двигунів, у зв'язку з особливостями їхнього виготовлення: масовістю, значним обсягом в загальній трудомісткості виготовлення двигуна, великою номенклатурою і високими вимогами щодо якості.

Розглядаючи технологію виготовлення заготовок лопаток методами обробки металів тиском, можна відзначити, що застосування звичайного штампування і механічної обробки характеризується низьким коефіцієнтом

використання металу, високою трудомісткістю і не відповідає сучасним вимогам прогресивної технології [19]. Найважливішими напрямками виробництва заготовок лопаток є метод поздовжнього періодичного прокатування, гаряче вальцювання заготовок, точне штампування з малим припуском або без припуску на механічну обробку. Однак, з названих процесів поздовжнє періодичне прокатування профільних заготовок, точне штампування і холодне вальцювання є ще мало дослідженими, а тому знайшли поки обмежене застосування. Плин металу в осередку деформації при прокатуванні в валках зі змінним радіусом в даний час вивчено недостатньо, хоча досить часто саме ці питання обмежують отримання профілів в необхідному полі допусків з необхідною якістю. Тому подальше дослідження зазначених процесів викликає безсумнівний інтерес.

Перспективним і надійним методом отримання точних заготовок є метод видавлювання, так як він дозволяє отримувати точні заготовки з якісною структурою, оскільки в процесі деформації заготовка знаходиться в умовах всебічного стиснення. Таким чином, заготовка компресорної лопатки набуває рівноспрямованих волокон, що повторюють її геометрію. Це в подальшому дозволяє усунути вищезгадані недоліки і отримати якісні заготовки, при цьому значно підвищується якість деталей завдяки сприятливому поєднанню структури і механічних властивостей і зниження трудомісткості виготовлення лопаток.

Однак, при видавлюванні попередньої заготовки з титанових сплавів, останні налипають на поверхню інструменту, внаслідок чого на поверхні деталі з'являються риси, вм'ятини і задирки, а також з'являється різка неоднорідність структури по довжині і перетину виробу [20]. Найбільш вразливим місцем цього способу є недостатня стійкість інструменту [8]. Тому подальше дослідження даного способу є актуальним.

2 МЕТОДИКА ВИКОНАННЯ ДОСЛІДЖЕНЬ

2.1 Основні особливості системи *QForm*

QForm - це універсальний комплекс для математичного моделювання процесів обробки металів тиском. Програма заснована на методі скінчених елементів. (рис. 2.1)

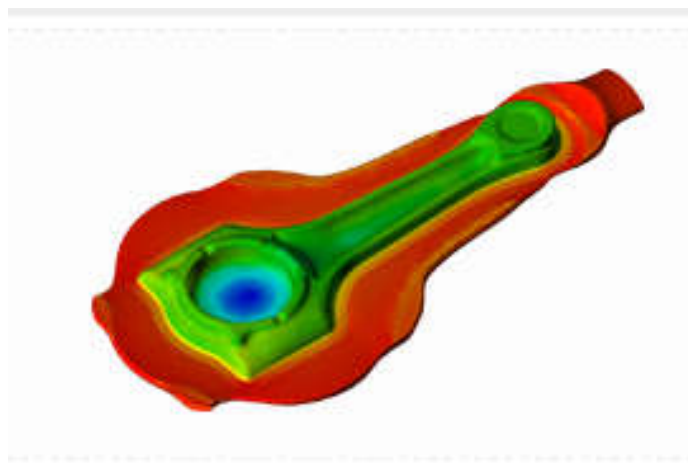


Рисунок 2.1 - Моделювання процесів ОМТ в програмі *QForm*

Метод скінчених елементів (МСЕ) - це чисельний метод розв'язання диференціальних рівнянь з частинними похідними, а також інтегральних рівнянь, що виникають при розв'язанні завдань прикладної фізики. Метод широко використовується для розв'язання завдань механіки деформованого твердого тіла, теплообміну, гідродинаміки і електродинаміки. Галузь, в якій шукається рішення диференціальних рівнянь, розбивається на кінцеву кількість елементів. У кожному з елементів довільно вибирається вид апроксимуючої функції.[21]

Коефіцієнти апроксимуючих функцій зазвичай шукаються з умови рівності значення сусідніх функцій на кордонах між елементами (у вузлах).

Потім ці коефіцієнти виражаються через значення функцій у вузлах елементів.

Складається система лінійних алгебраїчних рівнянь. Кількість рівнянь дорівнює кількості невідомих значень у вузлах, на яких шукається розв'язання вихідної системи, прямо пропорційно кількості елементів і обмежується тільки можливостями ЕОМ. Так як кожен з елементів пов'язаний з обмеженою кількістю сусідніх, система лінійних алгебраїчних рівнянь має розріджений вид, що істотно спрощує її розв'язання.

Немає ніякого жорсткого поділу системи на препроцесори і постпроцесори. Візуалізація процесів формозміни відбувається одночасно з розрахунком, що дозволяє негайно інтерпретувати отримані результати і вносити в технологію необхідні зміни.

QForm забезпечує автоматичне формування розрахункових моделей (розбиття на кінцеві елементи), що дозволяє забезпечити високу точність розрахунку, незалежну від кваліфікації користувачів

Область застосування *QForm* включає процеси об'ємного штампування (холодного та гарячого), кування, пресування, вальцювання, розкочування, прокатування.

У *QForm* можна моделювати майже всі відомі технологічні процеси формозміни металу.

Проводиться розрахунок холодного, теплого і гарячого об'ємного штампування. Кількість інструментів може бути задана до 20 з довільним напрямком руху. Висока точність розрахунку плину металу. Передбачається виникнення різних штампувальних дефектів, таких як незаповнення гравюри, закови і простріли. Характер плину металу може бути оцінений за Лагранжевими лініями, що розраховуються в заготовці.[21]

Геометрія інструменту і заготовки в процесі розрахунку плину металу апроксимується квадратичними поверхневими кінцевими елементами. Сітка всередині заготовки та інструментів створюється на основі лінійних тетраедрів. Для 3D розрахунку вихідні геометричні дані імпортуються в

QShape - тривимірний графічний модуль *QForm*, з *CAD* систем користувача в форматі *STEP/IGES*. Для *2D* розрахунку плоскі геометричні дані імпортуються в *QDraft* - двовимірний графічний модуль *QForm*, з *CAD* систем користувача в форматі *DXF*.

Повністю автоматичне створення початкової адаптованої кінцево-елементної сітки (рис.2.2)

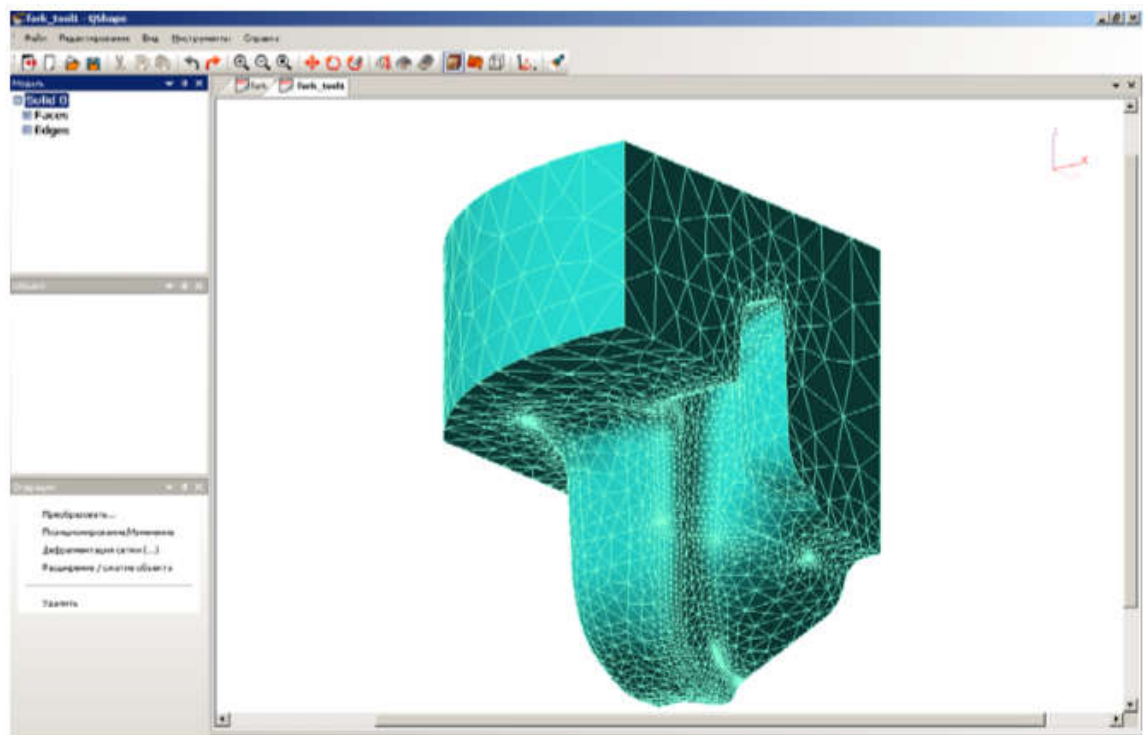


Рисунок 2.2 – Кінцево-елементна сітка у тривимірному графічному модулі *QShape*

У процесі розрахунку сітка перебудовується автоматично без втручання користувача. Процес покрокового розрахунку проводиться з повним автоматичним налагодженням кроку і збільшення. Заготовка розглядається як жорстко-пластичне тіло, що деформується в неізотермічних умовах. Можливий розрахунок порошкових (пористих) матеріалів в *3D*. Охолодження-нагрівання може бути розраховане як завдання

Термопружності. Наприклад, після гарячого штампування можна розрахувати зміну форми і порахувати виникаючі напруження в тілі після охолодження.

Інструмент розраховується як пружно-пластичне тіло в ізотермічних умовах. Можливий розрахунок переміщення заготовки під дією гравітації з урахуванням впливу тертя та інерції, а також визначення її положення перед штампуванням в інструменті зі складною поверхнею. Опір деформуванню матеріалу заготовки залежить від деформації, температури і швидкості деформації. Інші властивості матеріалу, такі як щільність, теплопровідність, теплоємність, модуль Юнга, межа плинності, залежать від температури.

Технологічний процес штампування розглядається як технологічний ланцюжок, який може складатися з $2D$ і $3D$ операцій, між якими заготовка передається автоматично. На заготовці можливе завдання до 3 площин симетрії. Між вертикальними площинами симетрії може бути будь-який кут.

Проводиться оцінка зношення інструменту в процесі штампування. Враховується вплив бандажних кілець при розрахунку напружень і деформацій в $3D$ інструменті (рис.2.3)

Деформація заготовки може бути порахована на механічному, ексцентриковому або кривошипному пресах, молотах, як шаботних, так і безшаботних, гвинтових і гідравлічних пресах. Параметри процесу (час, кінцеве положення інструментів, температура і т.д.) задаються за допомогою інтуїтивно-зрозумілого помічника завдання вихідних даних, що забезпечує повноту даних і оберігає від помилок. Кількість інструментів може бути задано до 20 з довільним напрямком руху.

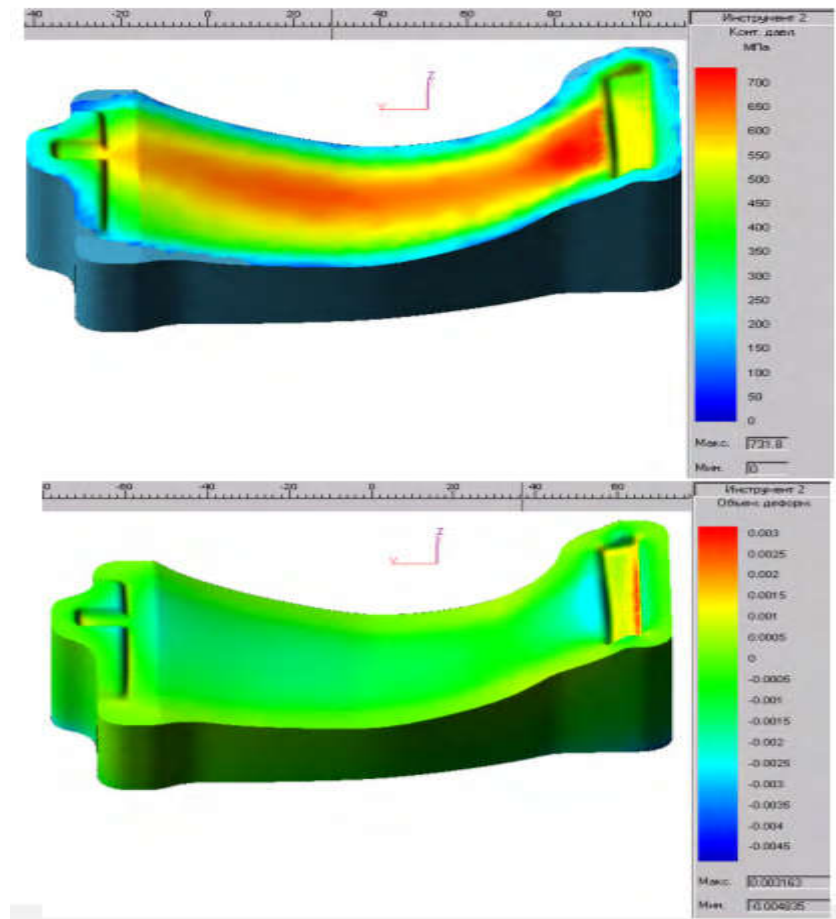


Рисунок 2.3 - Аналіз напружень в інструменті

Говорячи про особливості системи *QForm*, слід виділити наступні основні моменти [21]:

1. *QForm* є повнофункціональним об'єктно-орієнтованим додатком *Windows*. Простий і інтуїтивно зрозумілий графічний інтерфейс робить систему доступною і легкою у використанні навіть для початківців-користувачів персональних комп'ютерів. Завдяки наявності анімаційної системи допомоги і підказки система зручна у вивченні.

2. Повністю інтегрована архітектура *QForm* забезпечує синхронне виконання робіт будь-якої частини програми. Візуалізація процесів формозміни відбувається одночасно з розрахунком, що дозволяє негайно інтерпретувати отримані результати і вносити в технологію необхідні зміни.

3. При підготовці вихідних даних користувач оперує виключно технологічними поняттями і спілкується з системою звичною мовою конструктора-технолога, а майстер підготовки вихідних даних в режимі «питання-відповідь» дозволяє швидко і легко ввести всі необхідні для розрахунку параметри.

4. *QForm* забезпечує автоматичне формування розрахункових моделей (розбиття на кінцеві елементи), що дозволяє забезпечити високу точність розрахунку, незалежну від кваліфікації користувачів.

5. *QForm* дозволяє проаналізувати весь технологічний ланцюжок отримання поковки, включаючи нагрівання, охолодження і пластичне деформування на всіх переходах, зміну властивостей матеріалу.

2.2 Особливості технологічного процесу

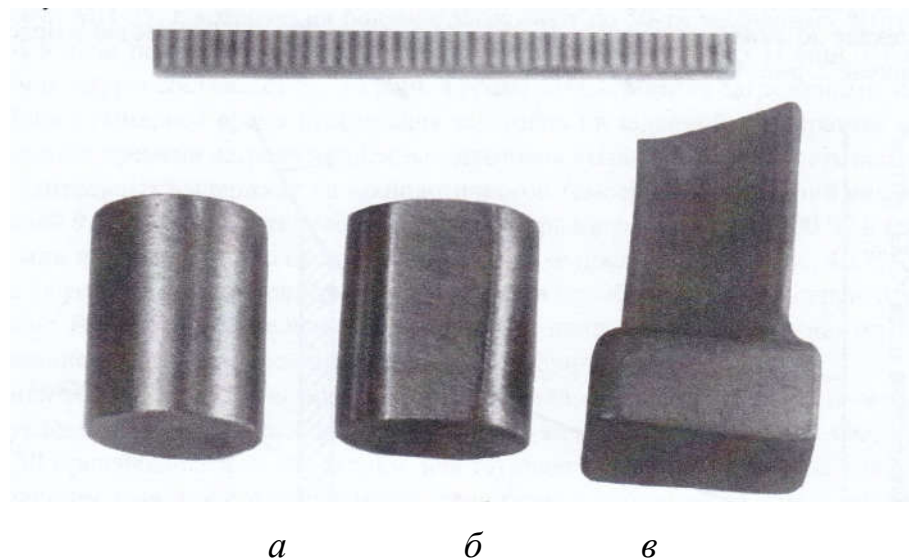
Видавлюванням отримують заготовки лопаток компресора під послідуєче вальцювання довжиною до 50 мм, які не мають розвинений масивний хвостовик, який в свою чергу наближається до квадрата, та відносно тонке перо.

Особливістю процесу точного видавлювання заготовок лопаток є застосування металевого змащення попередньої (вихідної) заготовки, яку перед нагріванням під деформування покривають гальванічним способом міддю товщиною 12...18 мкм із підшаром нікелю товщиною 1 мкм (для покращення зчеплення міді заготовки попередньо проходять нікель хлористу обробку в електроліті).[8]

В зв'язку з наявністю мідного покриття вихідні заготовки перед видавлюванням нагрівають при меншій температурі, ніж зазвичай рекомендовано для металу, що обробляється, наприклад, для сплаву ВТ-8 вона складає 870°C. таке зниження температури нагрівання перед

деформуванням викликане окисненням мідного покриття, яке при високій температурі нагрівання та тривалій витримці при цій температурі може повністю окислитися, оголивши основний матеріал.

На рис. 2.4 зображено технологічні переходи при видавлюванні заготовки лопатки. В залежності від геометричних розмірів хвостовика лопатки вихідна заготовка може бути циліндричною або проміжною, яка отримується осаджуванням (плющенням) циліндричної заготовки вздовж осі (рис. 2.4, *а*, *б*). видавлені заготовки лопатки мають довжину по перу до 55 мм, ширину – до 20 мм та максимальну товщину перерізу – до 4 мм.

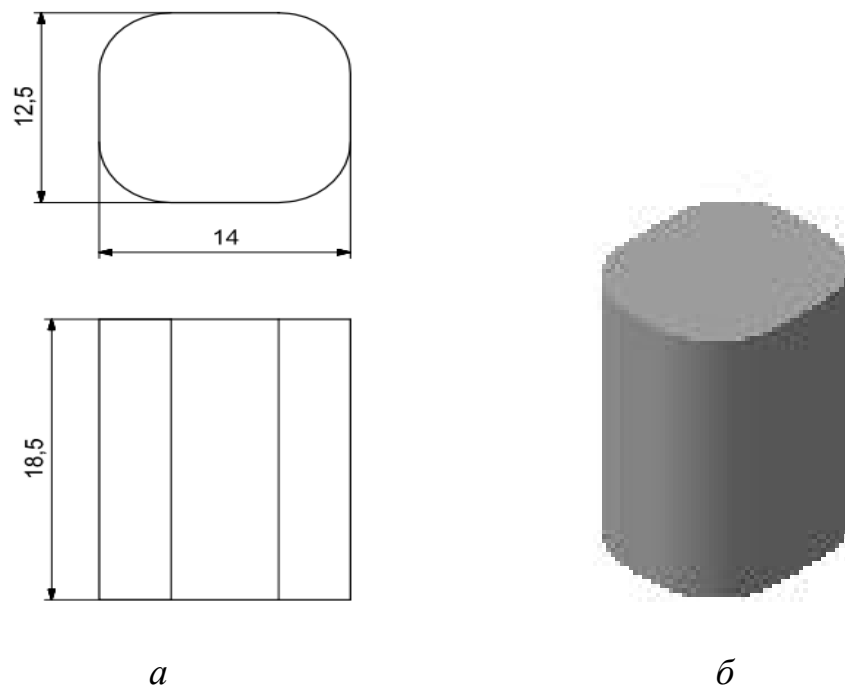


а – вихідна заготовка; *б* – попередня заготовка (плющена); *в* – видавлена заготовка лопатки

Рисунок 2.4 – Технологічні переходи при видавлюванні заготовки компресорної лопатки

2.3 Методика виконання досліджень

Вихідні розміри плющеної проміжної заготовки для видавлювання заготовки компресорної лопатки за один перехід представлено на рис. 2.5



a – ескіз заготовки; *б* – 3D-модель заготовки

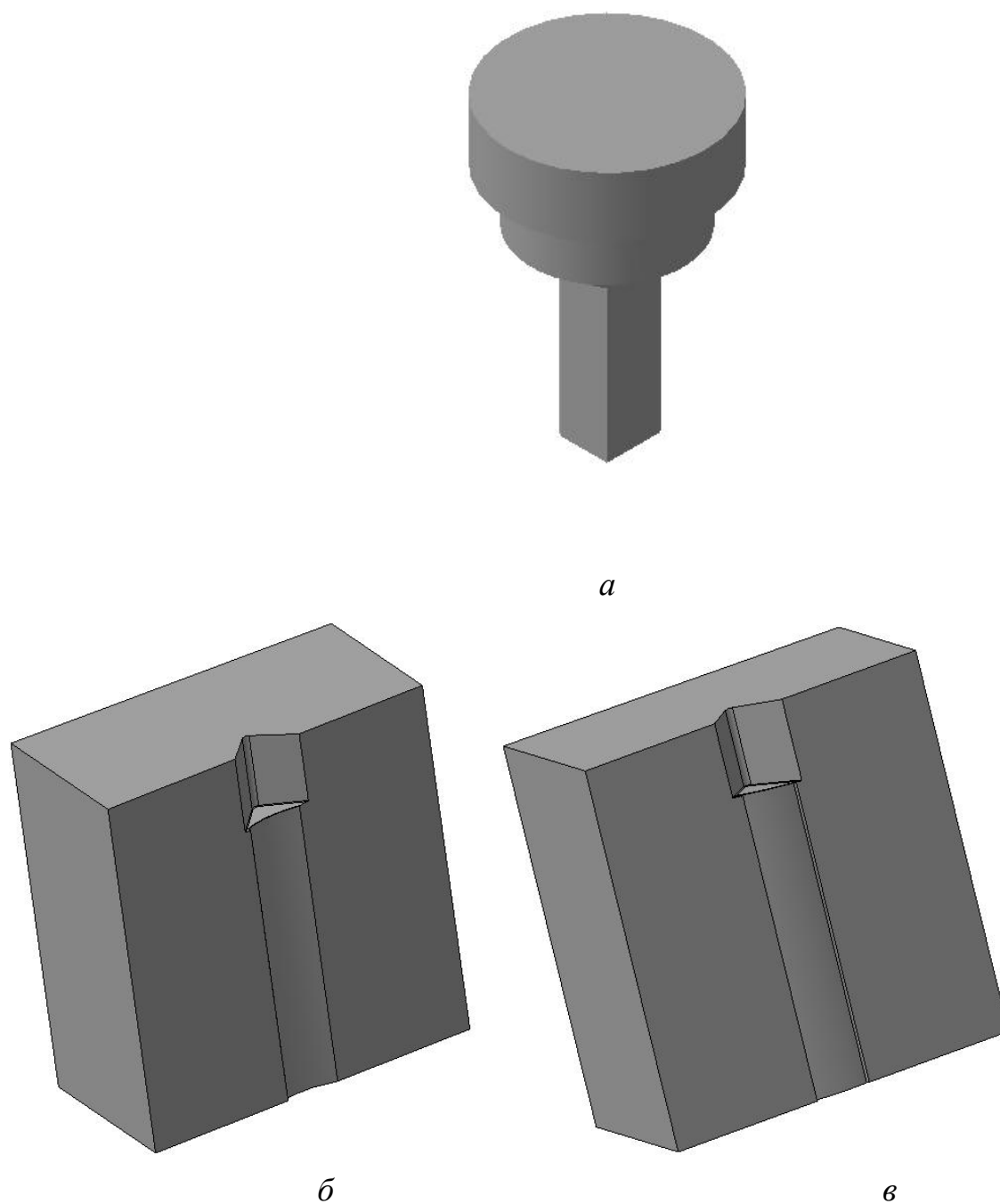
Рисунок 2.5 – Вихідна заготовка

За діючою технологією використовуються наступні параметри:

- обладнання – КГШП зусиллям 6,3 МН
- матеріал заготовки – ВТ8 ГОСТ 19807-91
- мастило для верхнього та нижнього інструментів– суміш графіту із машинним мастилом
- температура нагрівання заготовки - 870°C

- температура підігрівання верхнього та нижнього інструментів - 300°C.

На першому етапі моделювання було спроектовано 3D - моделі штамп, який складається із двох напівматриць та пуансону (рис. 2.6).



a – пуансон; *б* – вставка ліва; *в* – вставка права

Рисунок 2.6 – 3D моделі штампового оснащення

Для подальшої роботи в *QForm*, праву та ліву напівматриці необхідно з'єднати у збірці, після чого отримаємо готову модель матриці штампу для видавлювання (рис. 2.7).

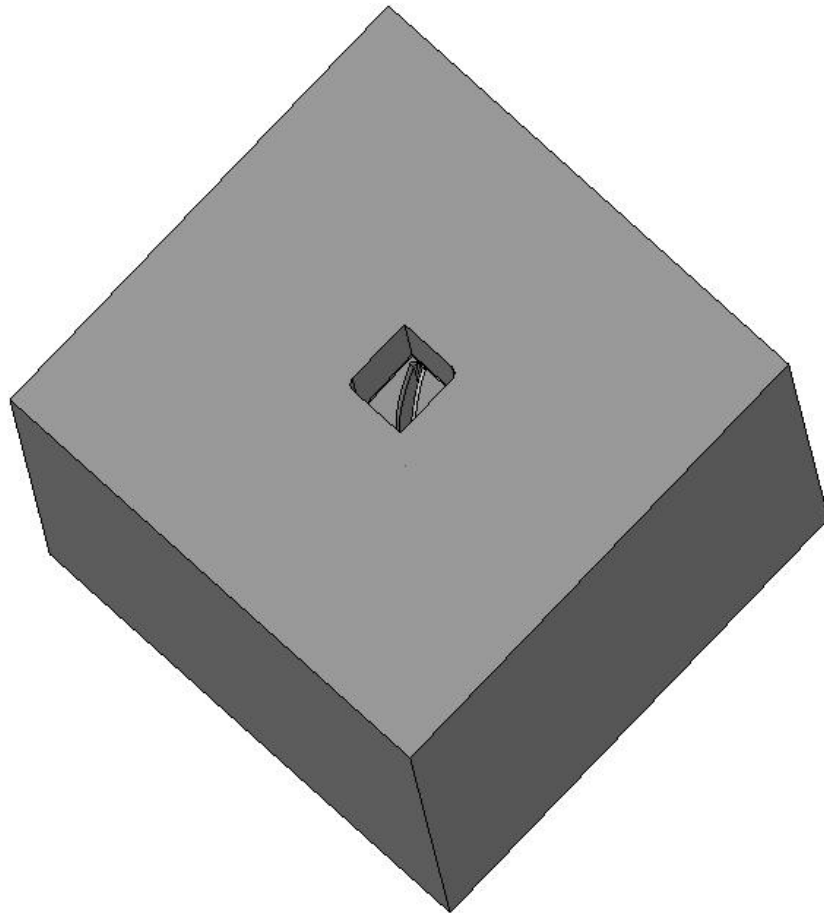


Рисунок 2.7 – 3D модель матриці штампу для видавлювання заготовок компресорних лопаток

На наступному етапі зберігаємо створені моделі у форматі *STEP* (або *IGES*) для можливості імпорту тривимірних твердотільних моделей в графічний модуль *QShape*, який розроблений для підготовки об'єктів геометрії для наступного моделювання у *QForm*.

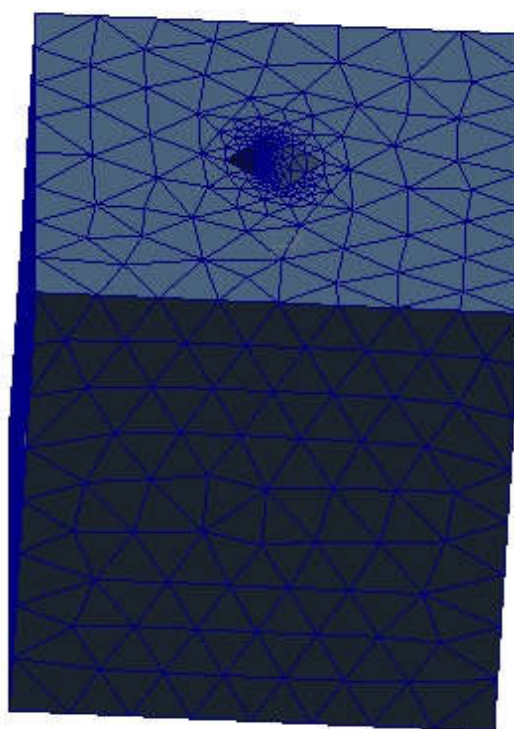
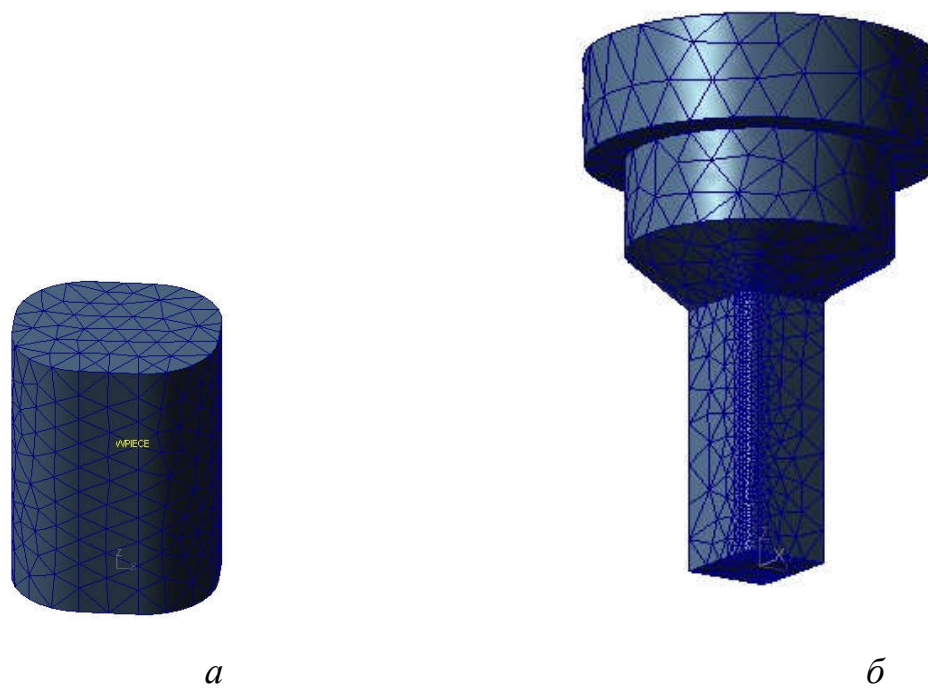
Геометричні моделі складаються із геометричних об'єктів, які відображені у вигляді структури відповідних вікон (рис. 2.8).



Рисунок 2.8 – Типи геометричних об'єктів у *QShape*

Об'єкти, зображені на рис. 2.8 – це поверхні, ребра, ланцюги та границі. В переліку *Faces* знаходяться всі поверхні, з яких складається тіло. В *Edges* – ребра, *Narrow Faces* – вузькі поверхні, *Tiny Edges* – малі ребра. Проводимо виправлення та видалення мілких дефектів поверхні.

Обираємо об'єкти *Shell* та генеруємо сітку, після чого його поверхні розбиваються на трикутні скінчені елементи. У місцях, де великий градієнт деформації, великий температурний градієнт, сітка автоматично змільчується (рис. 2.9). Після розбиття задаємо імена нашим об'єктам (рис. 2.9).



в

а - заготовка (*WPIECE*); *б* - пуансон (инструмент 1 - *TOOL1*); *в* - матрица (инструмент 2 - *TOOL2*)

Рисунок 2.9 – Моделі штампового оснащення та заготовки після розбиття сітки скінчених елементів

Об'єднаємо *TOOL1*, *TOOL2* та *WPIECE* в один файл. Виконаємо позиціонування об'єктів вздовж осей *X*, *Y* та *Z* (рис. 2.10).

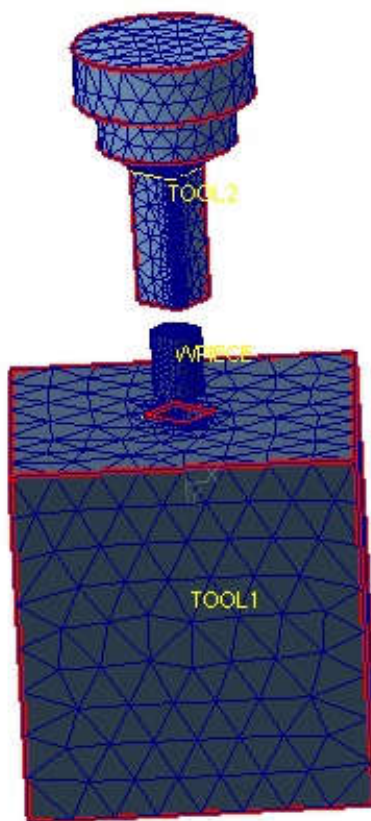


Рисунок 2.10 – Позиціонування об'єктів

Для наступного моделювання в *QForm* зберігаємо файл із позиціонованими об'єктами у форматі *SHL*, який призначений для моделювання деформування заготовки та розрахунку напружень в інструментах.

На цьому підготовка необхідних вихідних даних завершена.

Висновки

Основною задачею *QForm* є заміна натурного експерименту комп'ютерним моделюванням. Технологу запропоновано інструмент, за допомогою якого мін може спроектувати поковку та штамп, проводячи всі необхідні дослідження не у цеху за пресом, а за монітором комп'ютера, більш поглиблено вивчаючи сам процес пластичного деформування та свідомо вносячи всі необхідні конструктивні зміни. При цьому економиться час, а також вартість штампового оснащення, яке при комп'ютерному моделюванні можна виготовити максимально точно з уникненням браку поковок.

Використання програми комп'ютерного моделювання *QForm 2D/3D* при розробці та засвоєнні технології гарячого штампування заготовок компресорних лопатко скорочує термін підготовки виробництва, підвищує якість поковок та стійкість штампового оснащення. Виробничий досвід підтверджує високу точність комп'ютерного моделювання гарячого об'ємного штампування.

3 РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕНЬ

3.1 Алгоритм створення розрахункової моделі в *QForm*

Вихідними даними, які визначають розрахунок, є геометричні та технологічні дані, які отримані у 2 розділі.

Задамо вихідні дані, обираючи нову операцію в «Редакторі підготовки вихідних даних». На першому етапі підготовки даних обираємо із запропонованих нам програмою видів процесу – деформацію у механічному пресі (рис. 3.1).

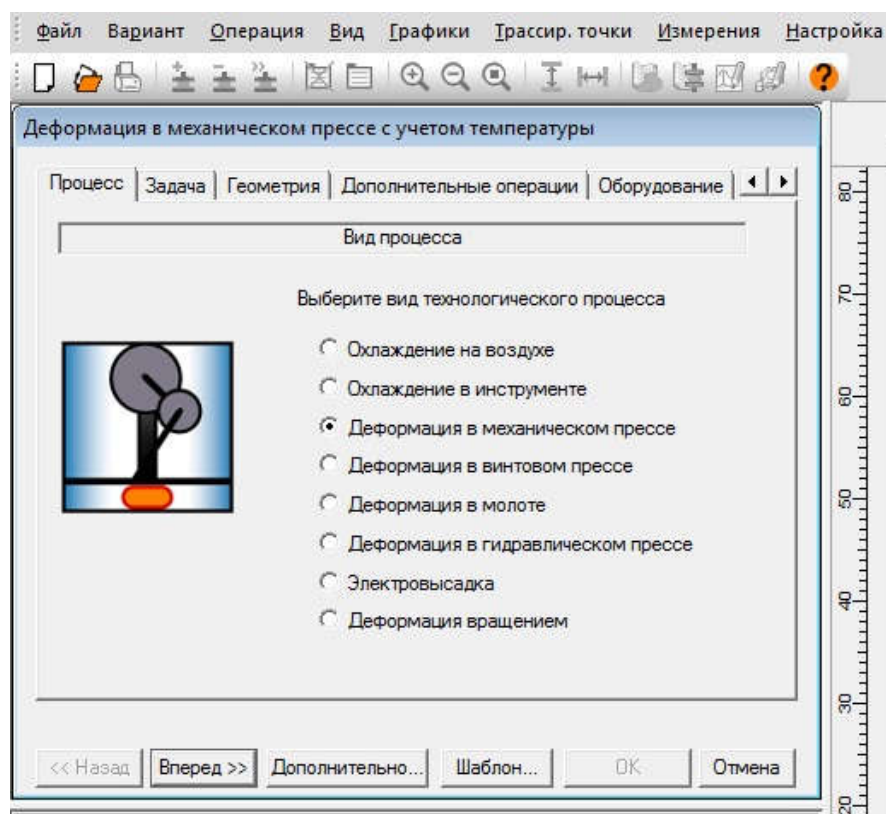


Рисунок 3.1 – Завдання виду процесу

Після визначення типу процесу, вказуємо тип задачі, що моделюється – довільна (тривимірне моделювання), одночасно вказуючи на те, що деформівний інструмент моделюється (рис. 3.2).

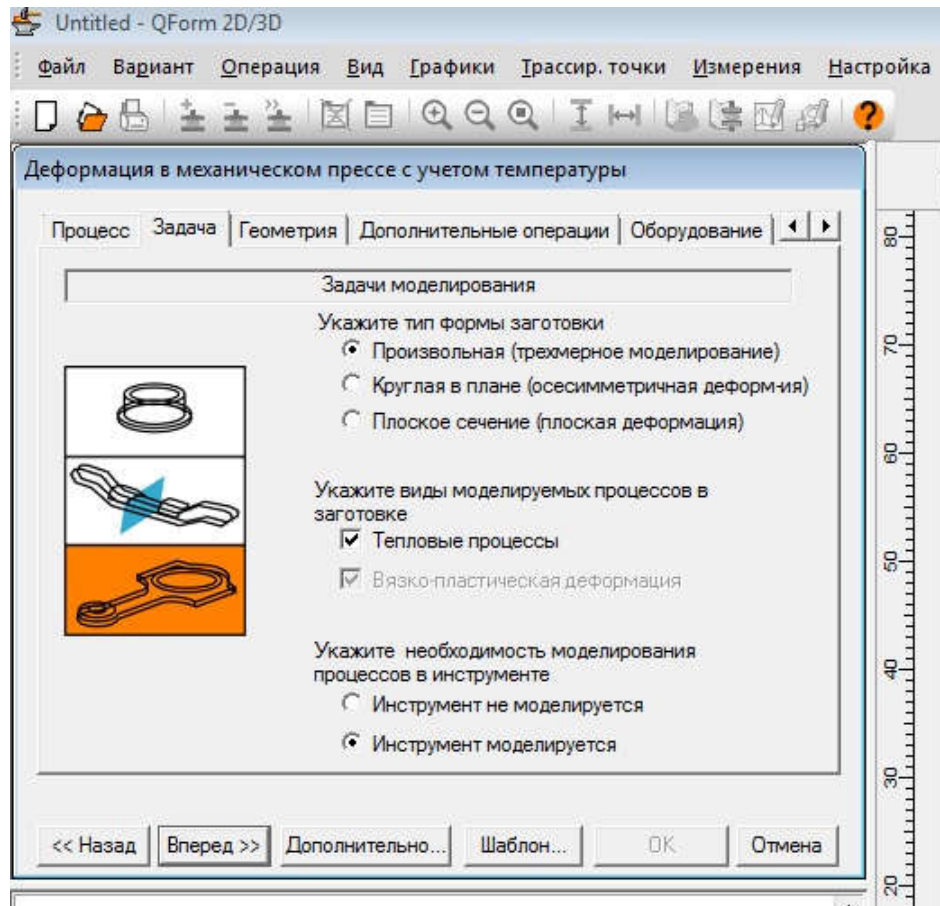


Рисунок 3.2 – Завдання задачі моделювання

Наступний етап – вибір геометрії. Обираємо створений файл із позиціонованими інструментами та заготовкою у форматі *SHL*, який призначений для моделювання деформування заготовки. В динамічному вікні можемо переглянути імпортовані із файла зображення, завдяки чому перевіряємо вірність вибору файлу та його відповідність вимогам програми (рис. 3.3).

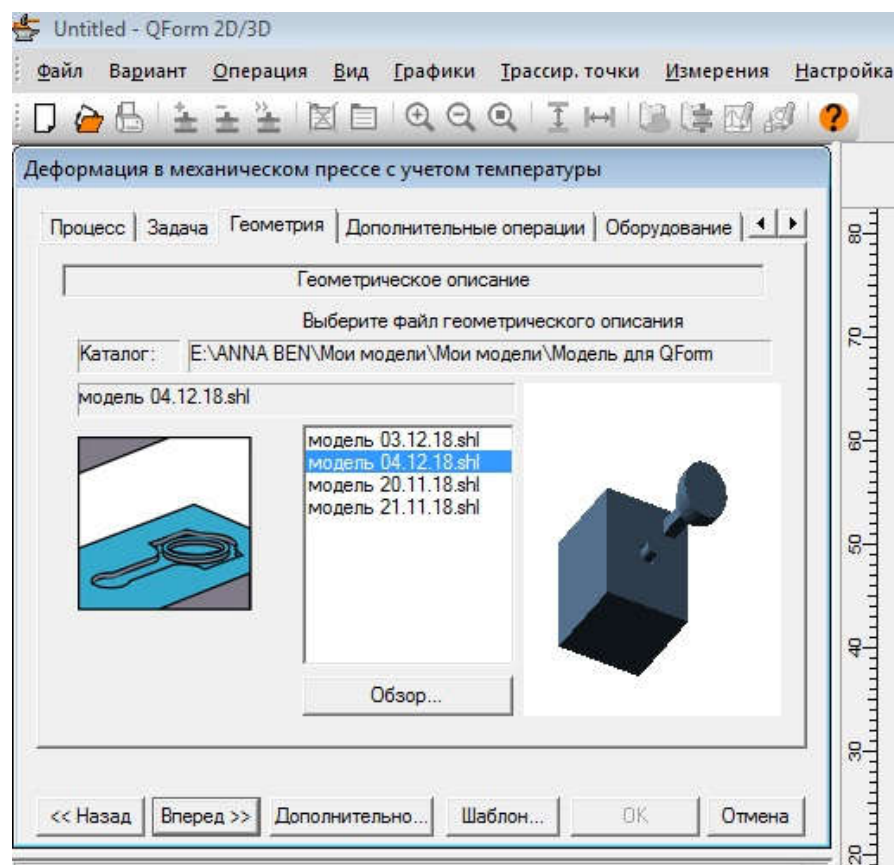


Рисунок 3.3 – Завдання моделі

В закладці «Додаткові операції» обираємо – охолодження на повітрі та охолодження в інструменті, вказуючи відповідний час (рис. 3.4).

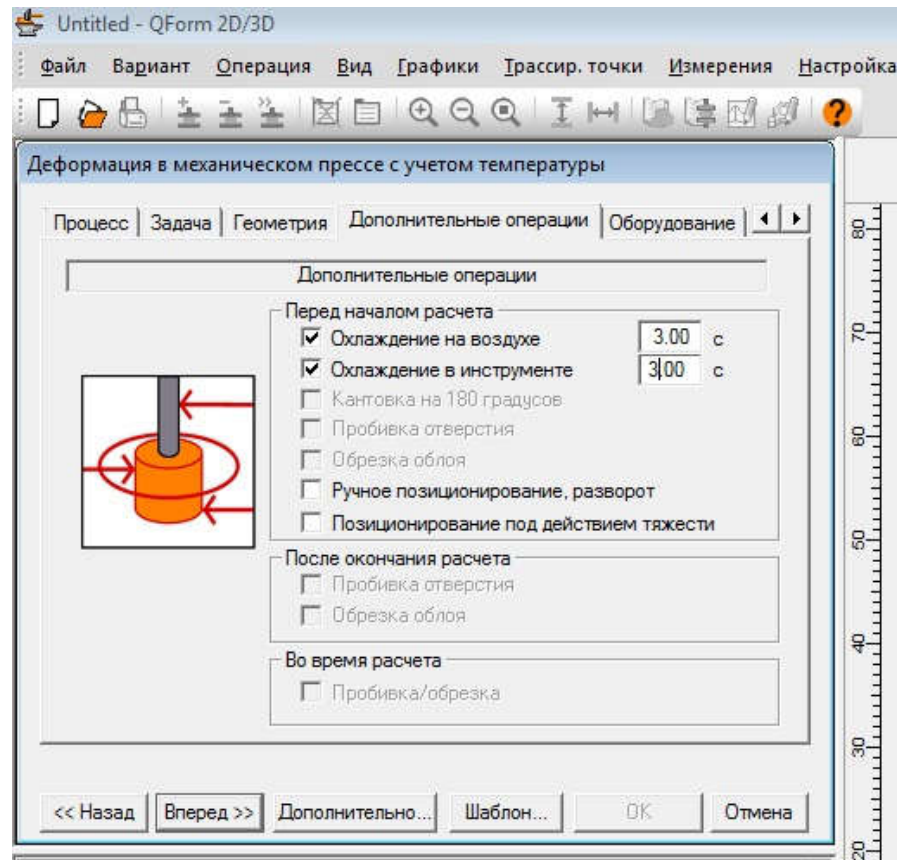


Рисунок 3.4 – Завдання додаткових операцій

На наступному етапі в закладці «Обладнання» із переліку запропонованого програмою обладнання обираємо механічний прес зусиллям 6,3 МН. Після його вибору відобразяться його параметри:

- кількість ходів – 100 хв^{-1} ;
- хід пресу – 200 мм;
- номінальне зусилля – 6,3 МН;
- жорсткість – 7 МН/мм (рис. 3.5).

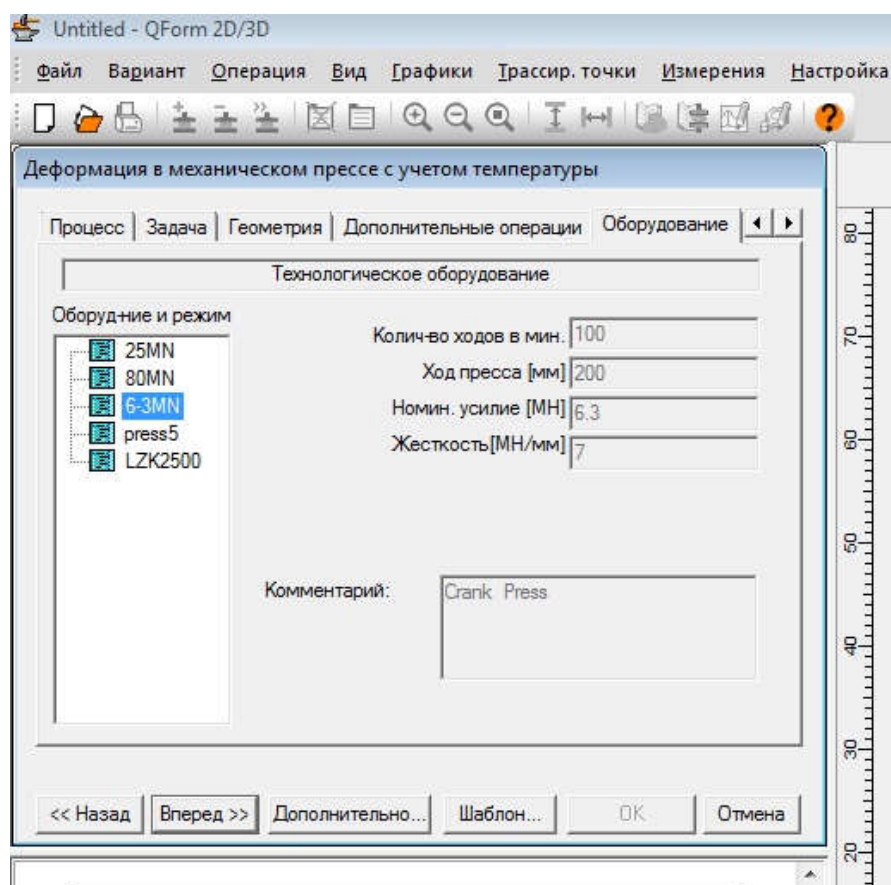


Рисунок 3.5 – Завдання технологічного обладнання

Після цього відповідно до технології задаємо кінцеву відстань між інструментами – 10 мм (рис. 3.6).

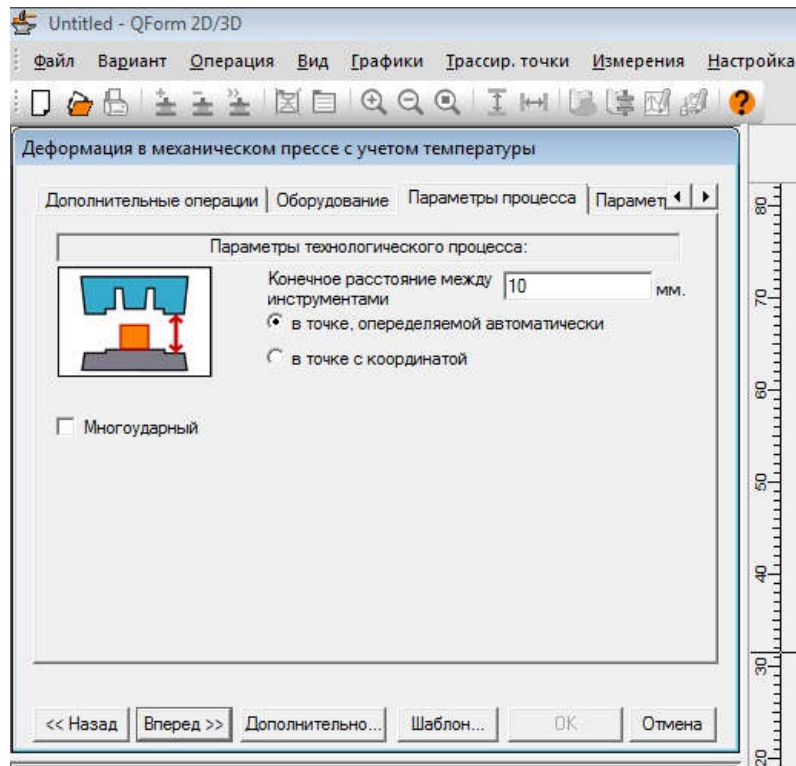


Рисунок 3.6 – Завдання кінцевої відстані між інструментами

Обираємо модель матеріалу, що деформується – ВТ6 (рис. 3.7), який має наступні характеристики:

- межа міцності при штампуванні $\sigma_{\sigma} = 950-1100$ МПа;
- відносне видовження при розриванні $\delta = 10 - 13\%$;
- відносне звуження $\psi = 35 - 60\%$;
- ударна в'язкість $KCU = 400-800$ кДж/м²;
- твердість $HB130-160$;
- температура плавлення 1668°C ;
- температура кипіння 3260°C .

Титановий сплав має низку переваг:

- висока механічна міцність;
- низька щільність, що значно зменшує масу виробів;
- висока корозійна стійкість;
- питома міцність титанових сплавів майже вдвічі перевищує питому міцність легованих сталей.

Після вибору марки матеріалу відображаються межі застосування кривих текучості. Задаємо температуру нагрівання заготовки (рис. 3.7).

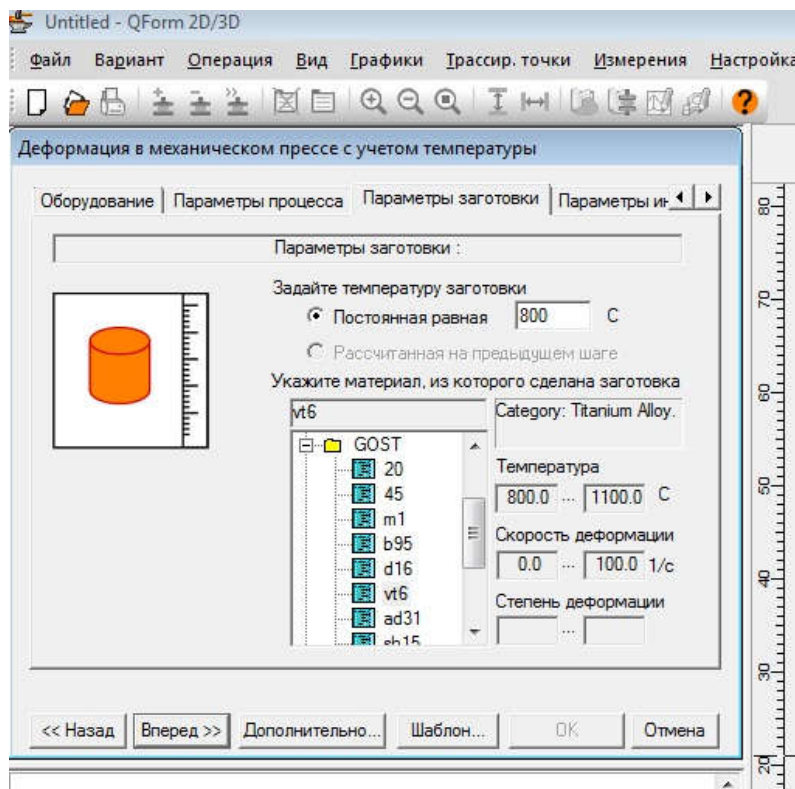


Рисунок 3.7 – Завдання параметрів заготовки

Обираємо тип змащення та температуру нагрівання штампів для «Інструменту 1». Із переліку, запропонованого програмою, обираємо матеріал графітового мастила – «gw-si-h» та вказуємо значення температури підігрівання штампу - 300°C (рис. 3.8).

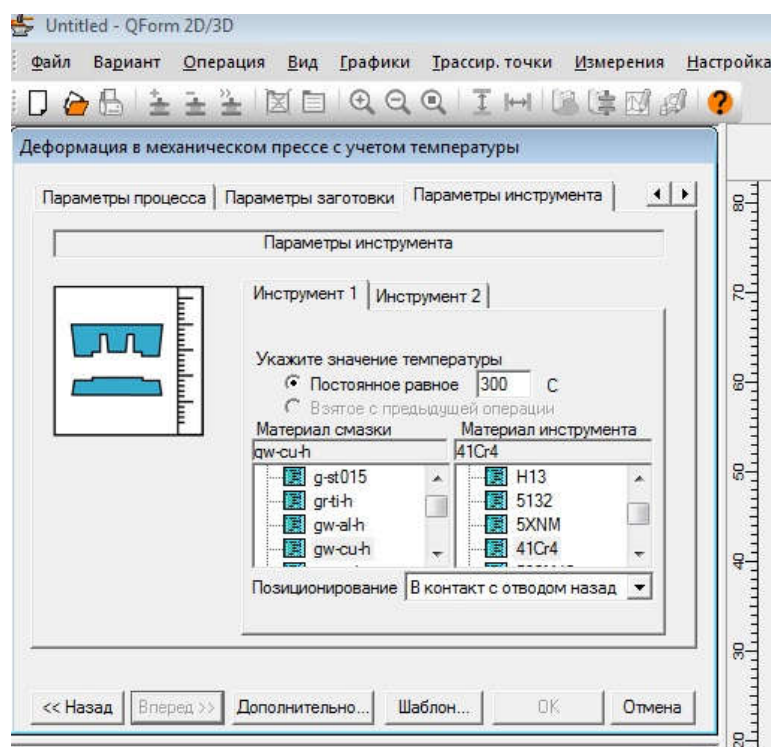


Рисунок 3.8 – Завдання параметрів інструменту

Дані для «Інструменту 2» задаємо аналогічно «Інструменту 1».

Всі дані, які необхідні для моделювання операції, задані. Створюємо файл проекту, в якому будуть зберігатися всі дані, необхідні для моделювання процесу видавлювання заготовки компресорної лопатки (рис. 3.9).

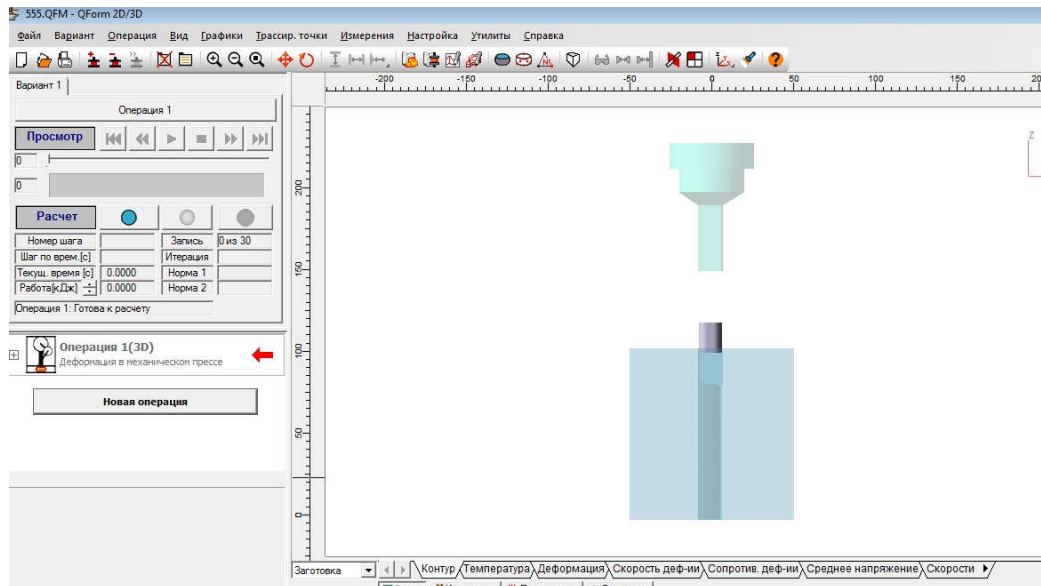


Рисунок 3.9 – Розрахункова модель процесу видавлювання заготовки компресорної лопатки

3.2 Моделювання процесу видавлювання заготовки компресорної лопатки на кривошипному пресі

3.2.1 Моделювання процесу деформування при температурі 800°C

Для розрахунку задамо наступні технологічні параметри:

- виду процесу – деформація у механічному пресі зусиллям 6,3 МН;
- задача моделювання – тривимірна із моделюванням інструменту;
- додаткові операції – час охолодження на повітрі 3 с, час охолодження в штампі 3 с;
- кінцева відстань між інструментами – 10 мм;
- параметри заготовки – модель матеріалу ВТ6, температура нагрівання 800°C;
- параметри інструменту (Пуансон) – матеріал інструменту 5ХНМ, температура підігріву 300°C, матеріал мастила «gw-cu-h»;
- параметри інструменту (Матриця) – аналогічно пуансону

Запускаємо програму на розрахунок. Виконується видавлювання заготовки. На початковій стадії запису розрахунку формозміни спостерігаємо напруження в нижній частині заготовки, яка під дією тиску інструменту заповнює порожнину штампу (рис. 3.10).

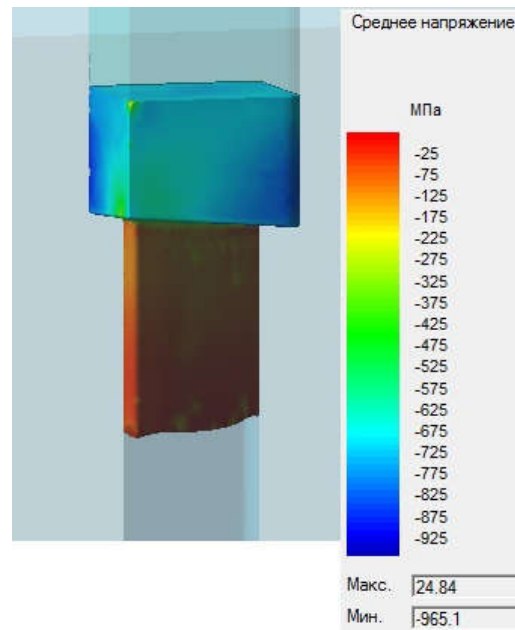


Рисунок 3.10 – Середнє напруження заготовки при температурі 800°C

Спостерігаємо зростання температури металу в західній зоні матриці, де одночасно відбувається максимальний опір деформуванню, що характеризується деформаційним розігрівом металу заготовки (рис. 3.11). Аналіз поля опору деформуванню дозволяє виявити найбільш важко заповнювані ділянки в рівчаку інструменту та найбільш напружені частини інструменту (рис. 3.12).

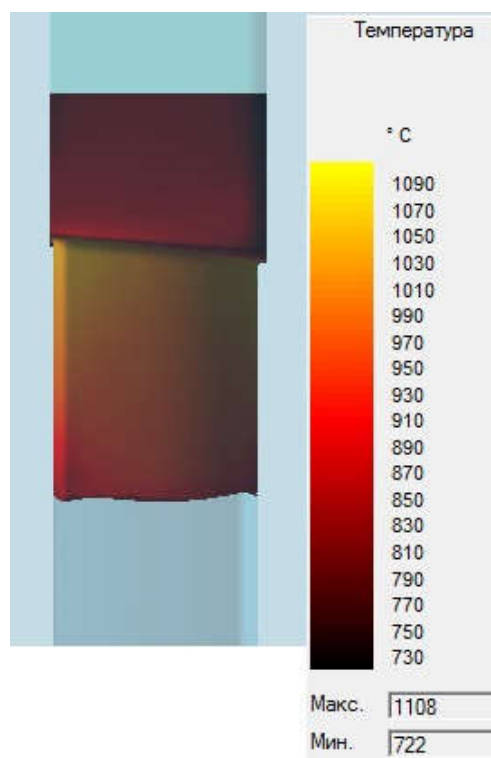
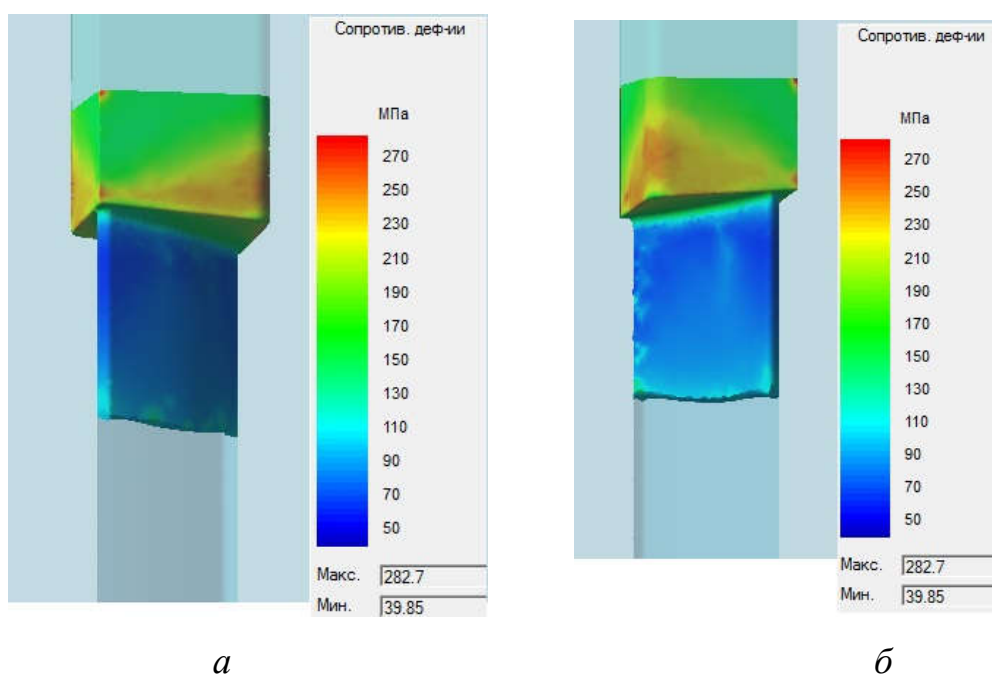


Рисунок 3.11 – Температурне поле заготовки в процесі деформування при температурі 800°C



а – спинка заготовки лопатки; *б* – корито

Рисунок 3.12 – Опір деформуванню при температурі 800°C

На рис. 3.13 зображено графік залежності зусилля від кута повороту кривошипу преса

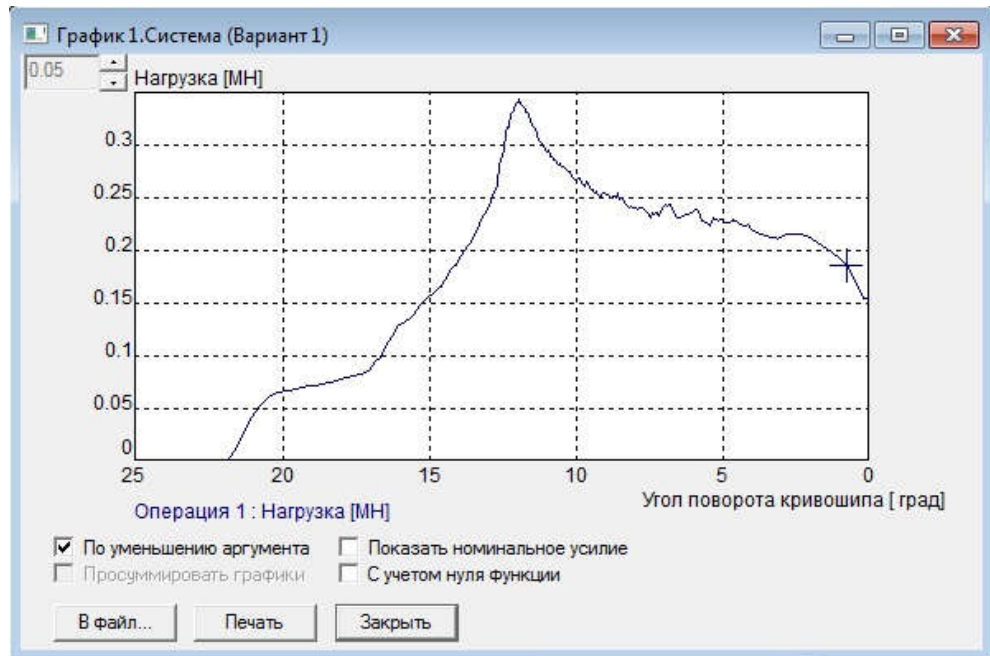
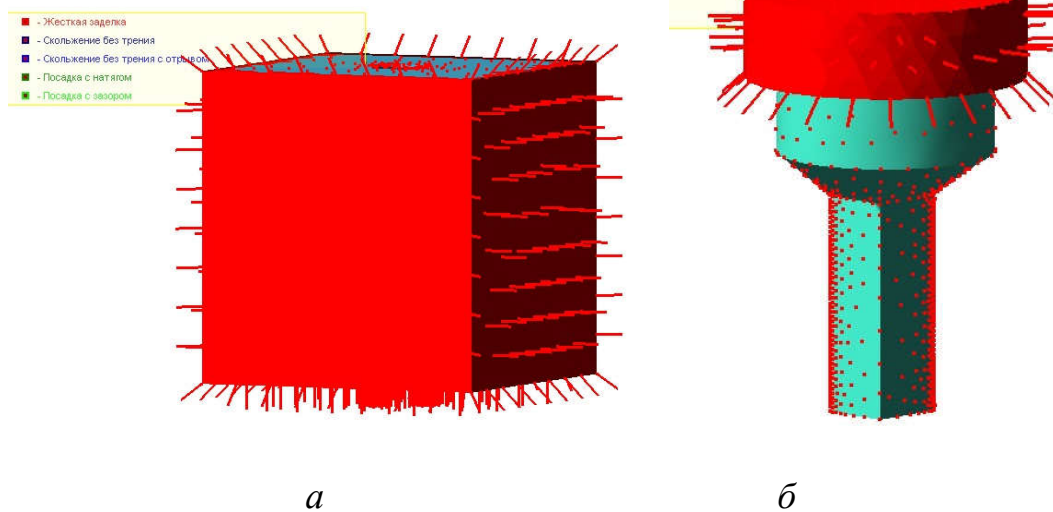


Рисунок 3.13 - Графік залежності зусилля видавлювання від кута повороту кривошипа пресу при температурі 800°C

Із аналізу графіка видно, що зусилля повільно зростає до середини процесу, коли відбувається осаджування заготовки; в момент, коли метал заготовки входить у вічко матриці, зусилля різко зростає до 0,34 МН, що характеризується зростанням опору деформування та затрудненим плином металу; після цього відбувається поступове зниження зусилля деформування.

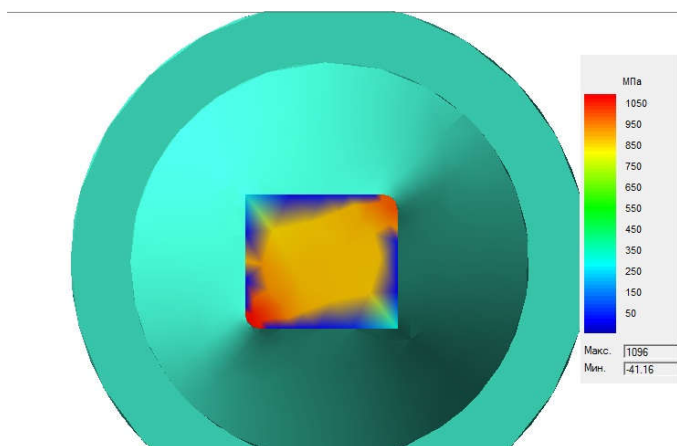
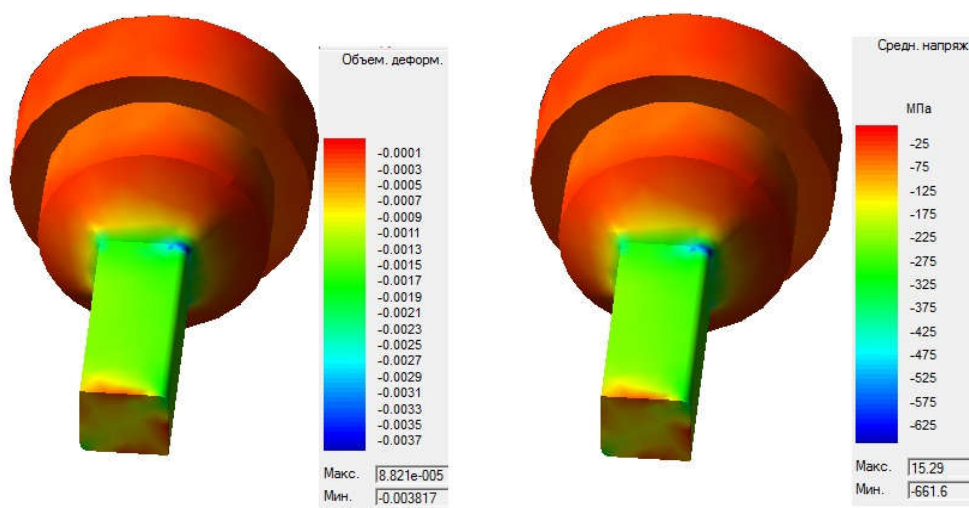
Окрім моделювання процесу деформування, моделювався також деформуючий інструмент. В якості матеріалу штампа було обрано модель матеріалу 5ХНМ, яка є в базі даним програми QForm. Також задавалося позиціонування інструменту – жорстке кріплення на характерних контактних ділянках (рис. 3.14).



a – матриця; *б* - пуансон

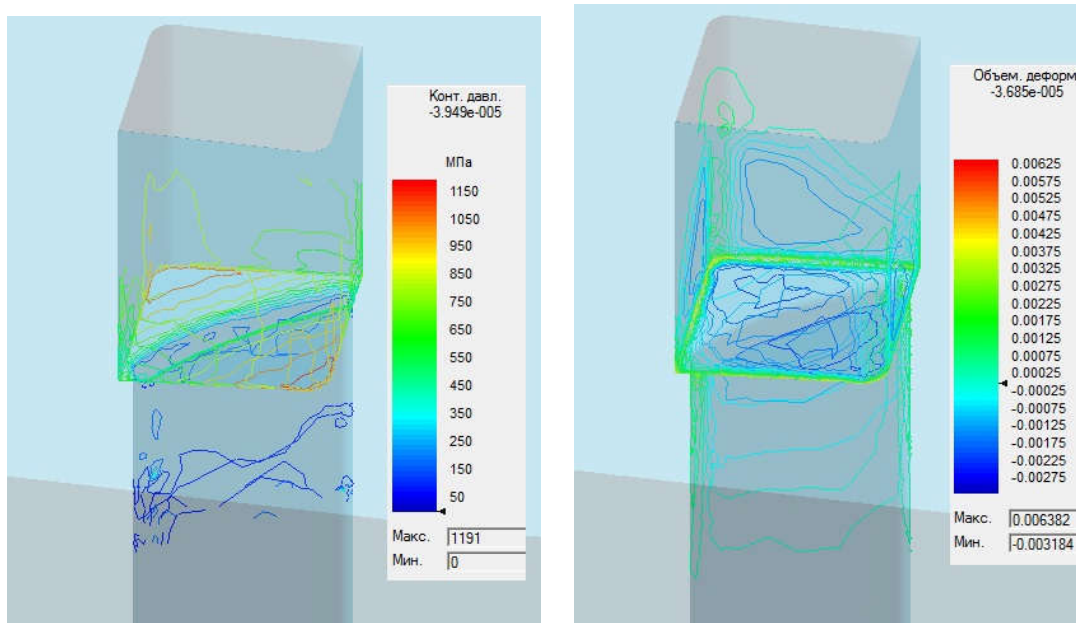
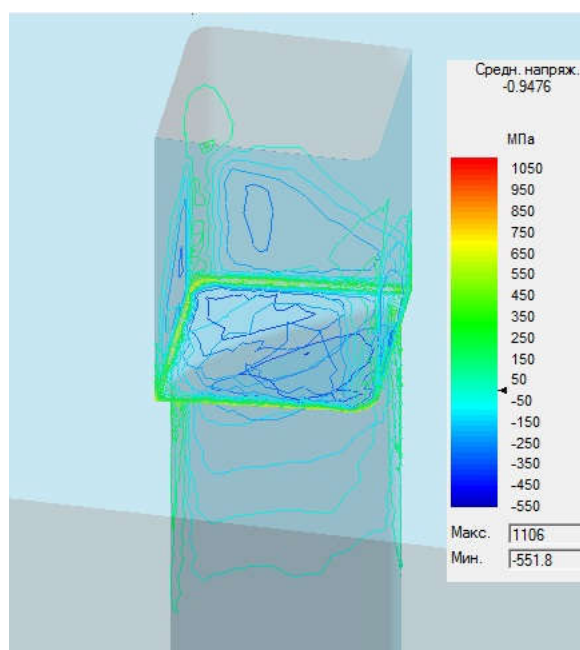
Рисунок 3.14 – Граничні умови для інструменту

Після цього проводився розрахунок щодо контактної тиску, об'ємної деформації та середнього напруження. На рис. 3.15 зображено відповідні розрахунки для пуансона, а на рис. 3.16 – для матриці.

*a**б**в*

a – контактний тиск на пуансоні; *б* – об'ємна деформація на пуансоні;
в - середні напруження на пуансоні

Рисунок 3.15 – Розрахунок напружень на пуансоні при видавлюванні заготовки на механічному пресі при температурі t 800°C

*a**б**в*

a – контактний тиск в матриці; *б* – об’ємна деформація в матриці;
в - середні напруження в матриці

Рисунок 3.16 – Розрахунок напружень в порожнині матриці при видавлюванні заготовки на механічному пресі при температурі t 800°C

Із аналізу напружень на пуансоні видно, що на контактній поверхні максимум спостерігається в радіусах закруглень бічних ребер і сягає максимуму 1096 МПа (мінімум становить $-41,16 \text{ МПа}$). Максимальна об'ємна деформація на пуансоні – у кутах бічних ребер.

Із аналізу напружень в порожнині матриці максимальні контактні напруження спостерігаються, так само, як і в пуансоні, в радіусах закруглень бічних ребер і сягає максимуму 1191 МПа . Що стосується об'ємної деформації в матриці та контактних напружень, критичних значень не спостерігаємо.

3.2.2 Моделювання процесу деформування при температурі 850°C

Для моделювання розрахунку задамо наступні параметри (рис. 3.17):

- виду процесу – деформація у механічному пресі зусиллям $6,3 \text{ МН}$;
- задача моделювання – тривимірна із моделюванням інструменту;
- додаткові операції – час охолодження на повітрі 3 с , час охолодження в штампі 3 с ;
- кінцева відстань між інструментами – 10 мм ;
- параметри заготовки – модель матеріалу ВТ6, температура нагрівання 850°C ;
- параметри інструменту (Пуансон) – матеріал інструменту 5ХНМ, температура підігріву 300°C , матеріал мастила «gw-cu-h»;
- параметри інструменту (Матриця) – аналогічно пуансону

Отчет о результатах моделирования

файл: I:\Мои модели\Моделирование\07.12.18_2\07.12.18_2.qfm
 Вариант: Вариант 1
 Комментарий к варианту:

Операция 1	Механический пресс
------------	--------------------

Тип: Трехмерная деформация
 Оборудование: 6-3MN
 файл геометрии: C:\Users\user\Desktop\модель 04.12.18.shl
 Время охлаждения на воздухе, с: 3
 Время охлаждения в инстру-те, с: 3
 Температура заготовки, С: 850
 Конечное расстояние, мм: 10
 Материал заготовки: GOST\vt6.mp

Характеристика инструментов:

Номер	Температура, С	Смазка	Материал
1	300	qw-cu-h.lp	5XNM.mp1
2	300	qw-cu-h.lp	5XNM.mp1

Рисунок 3.17 – Звіт про результати моделювання та параметри процесу

Після розрахунку отримуємо дані щодо кінематики плинину металу заготовки у порожнині матриці. На рис. 3.18 зображено характеристику розподілення температурного поля в заготовці по завершенню процесу.

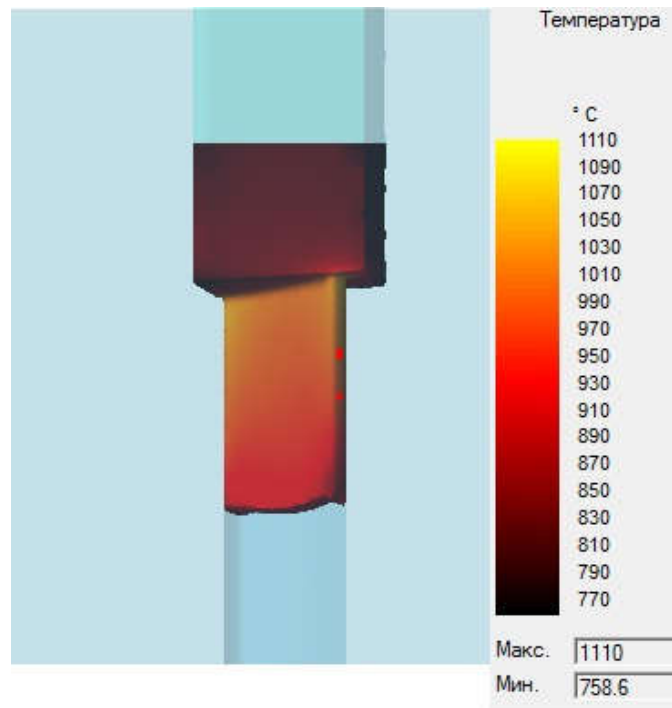


Рисунок 3.18 – Температурне поле заготовки після її видавлюванні за температури 850°C

Із аналізу видно, що температура підіймається до 1110°C в західній зоні матриці, що відбувається внаслідок деформаційного розігрівання при видавлюванні; на площині контакту пуансону із заготовкою температура падає до 758°C.

На рис. 3.19 представлено середні напруження у заготовці лопатки після видавлювання. Видно, що напруження змінюють свій знак, що характеризується зміною самої деформації від стискання у прес-залишку (-874,7 МПа) до розтягання у зоні пера (34,27 МПа), що характерно для всіх процесів прямого видавлювання.

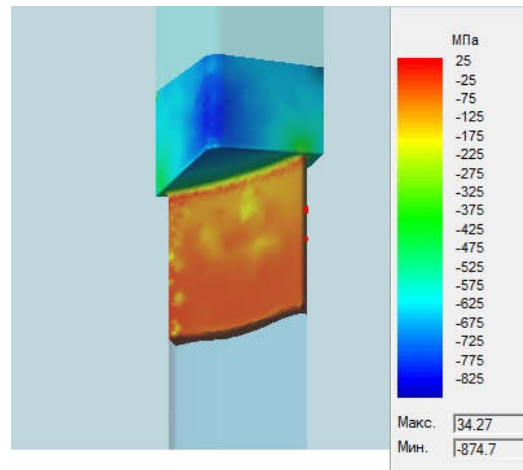
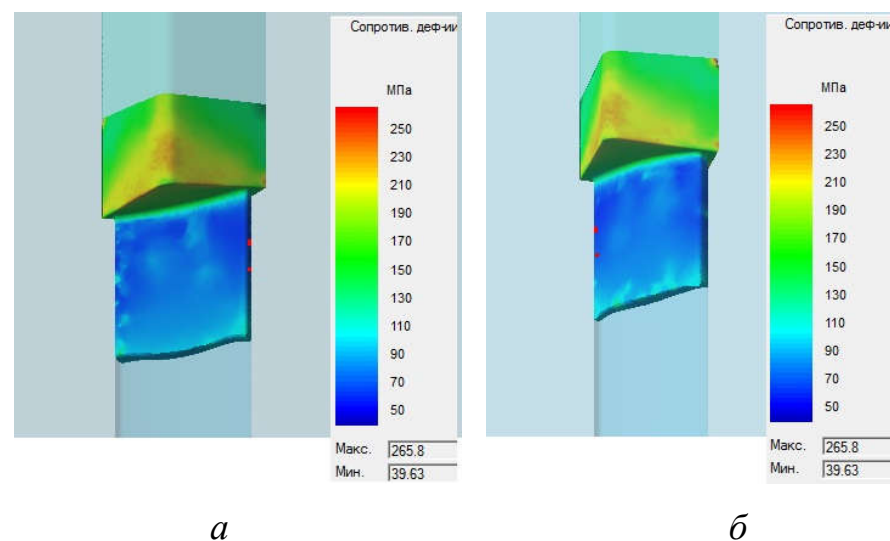


Рисунок 3.19 – Середнє напруження у видавленій заготовці лопатки при температурі 850°C

На рис. 3.20 представлено опір деформуванню заготовки лопатки в кінцевій стадії деформування зі сторони спинки та корита. Його значення коливаються в межах $39,63\dots 265,8 \text{ МПа}$. Максимальні значення спостерігаються у прямих кутах бічних граней контейнеру матриці. Така форма матриці диктується геометрією самої лопатки.



а – зі сторони корита; *б* – зі сторони спинки

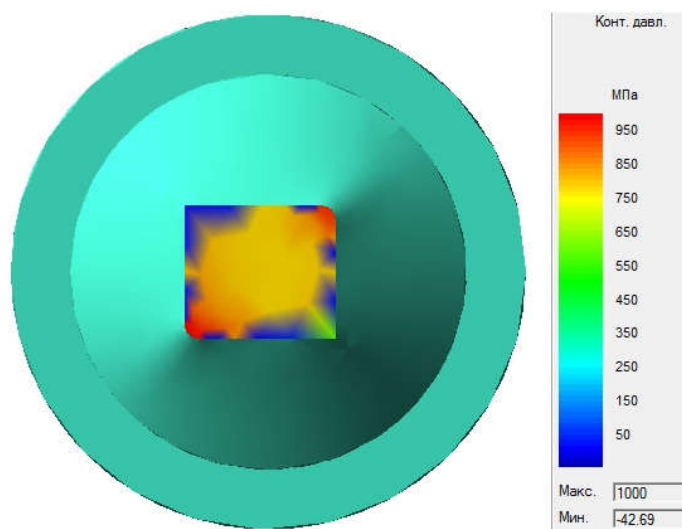
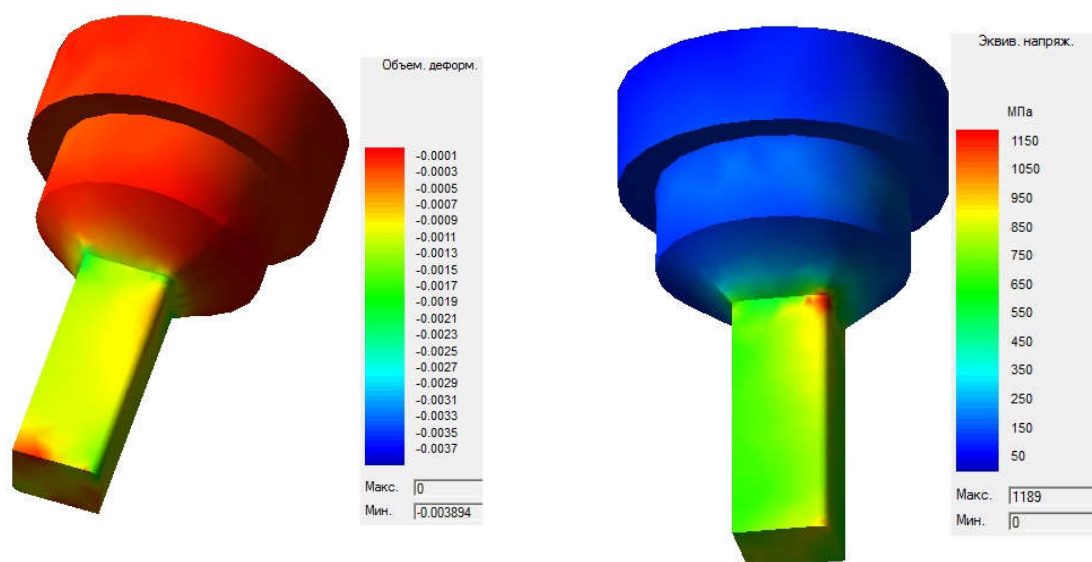
Рисунок 3.20 – Опір деформуванню заготовки лопатки в кінцевій стадії деформування при температурі $t 850^{\circ}\text{C}$

На рис. 3.21 зображено розподіл зусилля видавлювання при температурі $t 850^{\circ}\text{C}$ в залежності від кута повороту кривошипу преса. Аналогічно, як і для температури нагрівання $t 800^{\circ}\text{C}$, спостерігаємо характер кривої, лише максимальне зусилля дещо знижується із $0,34 \text{ МН}$ до $0,29 \text{ МН}$.



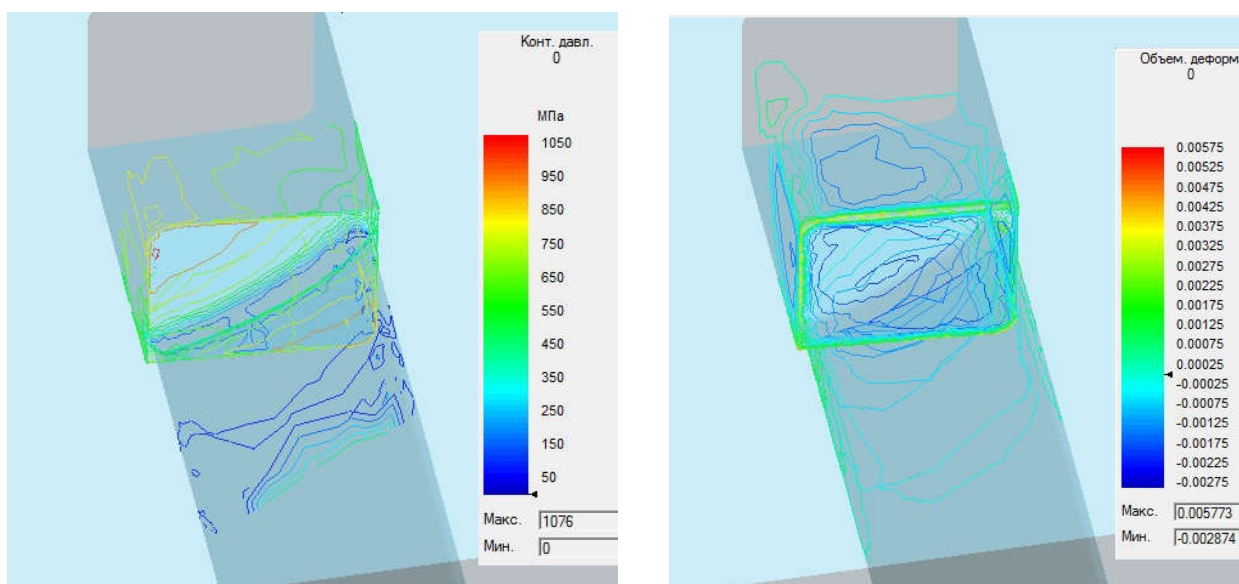
Рисунок 3.21 – Графік залежності зусилля видавлювання від кута повороту кривошипу пресу при температурі нагрівання $t 850^{\circ}\text{C}$

Також було змодельовано деформуючий інструмент при видавлюванні. Граничні параметри та спосіб закріплення обирався так само, як і в розділі 3.1.1 (див. рис. 3.14). На рис. 3.22-3.23 представлено відповідні розрахунки для пуансона та матриці.

*a**б**в*

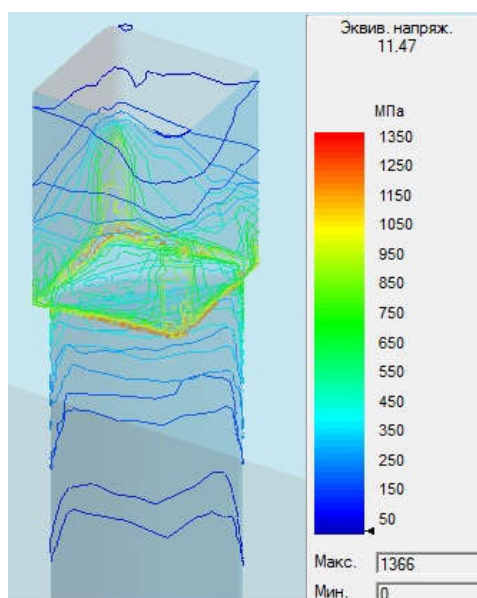
a – контактний тиск; *б* – об’ємна деформація; *в*- еквівалентні напруження

Рисунок 3.22 – Розрахунок напружень на пуансоні при видавлюванні заготовки на механічному пресі при температурі нагрівання $t = 850^{\circ}\text{C}$



а

б



в

а – контактний тиск; б – об’ємна деформація; в- еквівалентні напруження

Рисунок 3.23 – Розрахунок напружень в порожнині матриці при видавлюванні заготовки на механічному пресі при температурі нагрівання $t = 850^{\circ}\text{C}$

Із аналізу напружень на пуансоні видно, що на контактній поверхні максимум спостерігається в радіусах закруглень бічних ребер і сягає

максимуму 1000 МПа (мінімум становить -42,69 МПа). Максимальна об'ємна деформація на пуансоні – у кутах бічних ребер, концентрується на контактній поверхні із заготовкою. Еквівалентне напруження – 1189 МПа – концентрується у критичній точці з'єднання консольної частини із основою.

Із аналізу напружень в порожнині матриці максимальні контактні напруження спостерігаються, так само, як і в пуансоні, в радіусах закруглень бічних ребер і сягає максимуму 1076 МПа. Що стосується об'ємної деформації в матриці та контактних напружень, критичних значень не спостерігаємо. Еквівалентні напруження максимальні у бічних ребрах контейнеру в місцях радіусів округлення і становлять 1366 МПа.

Порівнюючи характер напружень на інструменті із відповідними напруженнями при температурі деформації t 800°C, можна відзначити, що взагалі напруження мають менші значення, що пояснюється більшою пластичністю металу та меншим опором деформуванню.

3.2.3 Моделювання процесу деформування при температурі t 900°C

Для моделювання розрахунку задамо наступні параметри (рис. 3.24):

- виду процесу – деформація у механічному пресі зусиллям 6,3 МН;
- задача моделювання – тривимірна із моделюванням інструменту;
- додаткові операції – час охолодження на повітрі 3 с, час охолодження в штампі 3 с;
- кінцева відстань між інструментами – 10 мм;
- параметри заготовки – модель матеріалу ВТ6, температура нагрівання 900°C;
- параметри інструменту (Пуансон) – модель матеріалу 5ХНМ, температура підігрівання 300°C, матеріал мастила «gw-cu-h»;
- параметри інструменту (Матриця) – аналогічно пуансону.

Отчет о результатах моделирования

файл: I:\Мои модели\Моделирование\06.12.18 моделируется ин-т\06.12.18.qfm
 Вариант: Вариант 1
 Комментарий к варианту:

Операция 1	Механический пресс		
Тип:	Трехмерная деформация		
Оборудование:	6-3MN		
файл геометрии:	I:\Мои модели\Модель для QForm\модель 04.12.18.shl		
Время охлаждения на воздухе, с:	3		
Время охлаждения в INSTR-TE, с:	3		
Температура заготовки, С:	900		
Конечное расстояние, мм:	10		
Материал заготовки:	GOST\vt6.mp		
Характеристика инструментов:			
Номер	Температура, С	Смазка	Материал
1	300	qw-cu-h.lp	5XNM.mp1
2	300	qw-cu-h.lp	5XNM.mp1

Рисунок 3.24 - Звіт про результати моделювання та параметри процесу при температурі $t 900^{\circ}\text{C}$

Після розрахунку отримуємо дані щодо кінематики плинину металу заготовки у порожнині матриці. На рис. 3.25 зображено характеристику розподілення температурного поля в заготовці по завершенню процесу.

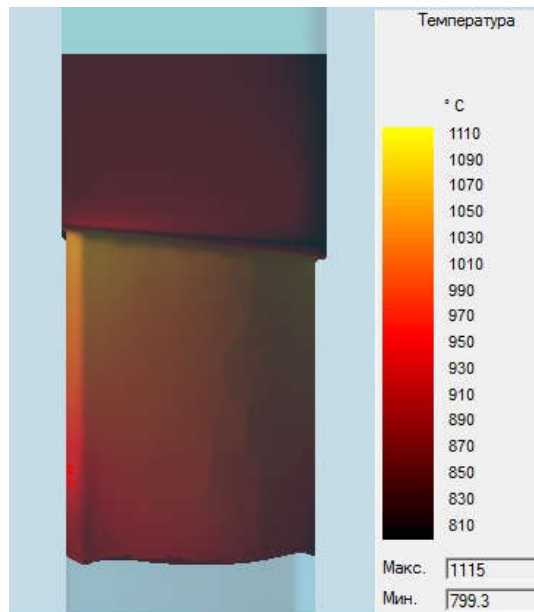


Рисунок 3.25 – Температурне поле заготовки після її видавлюванні за температури 900°C

Із аналізу видно, що температура підіймається до 1115°C в західній зоні матриці, що відбувається внаслідок деформаційного розігрівання при видавлюванні; на площині контакту пуансону із заготовкою температура падає до 799,3°C.

На рис. 3.26 представлено середні напруження у заготовці лопатки після видавлювання. Видно, що напруження змінюють свій знак, що характеризується зміною самої деформації від стискання у прес-залишку (-848,3 МПа) до розтягання у зоні пера (42,24 МПа), що характерно для всіх процесів прямого видавлювання. В порівнянні із процесом при температурі t 850°C напруження розтягання збільшується, що характеризується більшим значенням межі текучості матеріалу при збільшенні температури нагрівання.

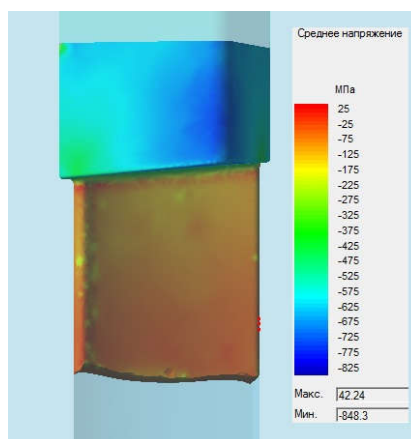
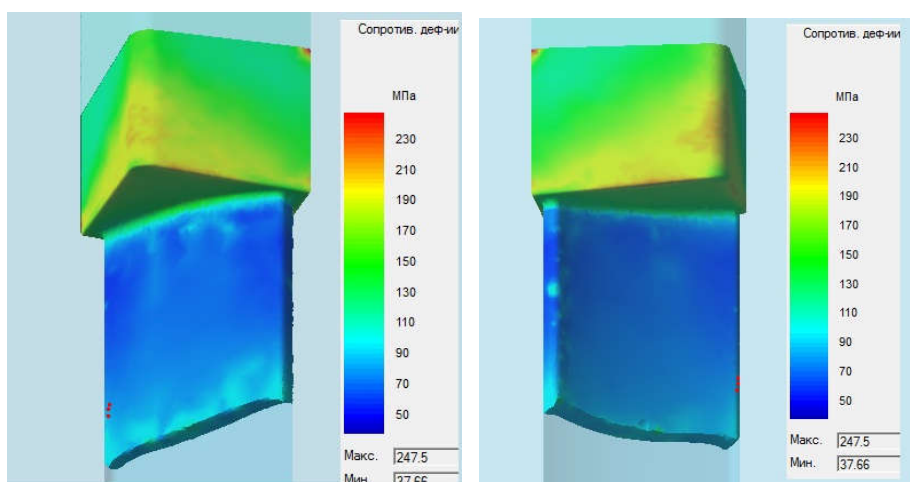


Рисунок 3.26 – Середнє напруження у видавленій заготовці лопатки при температурі 900°C

На рис. 3.27 представлено опір деформуванню заготовки лопатки в кінцевій стадії деформування зі сторони спинки та корита. Його значення коливаються в межах $37,66\dots 247,5$ МПа. Максимальні значення спостерігаються у прямих кутах бічних граней контейнеру матриці. Опір деформуванню нижчий, ніж при температурі $t\ 850^{\circ}\text{C}$.



а

б

а – зі сторони спинки; *б* – зі сторони корита

Рисунок 3.27 – Опір деформуванню заготовки лопатки в кінцевій стадії деформування при температурі $t\ 900^{\circ}\text{C}$

На рис. 3.28 зображено розподіл зусилля видавлювання при температурі $t 900^{\circ}\text{C}$ в залежності від кута повороту кривошипу преса. Аналогічно, як і для попередніх випадків, спостерігаємо характер кривої, лише максимальне зусилля дещо знижується до $0,26 \text{ МН}$.

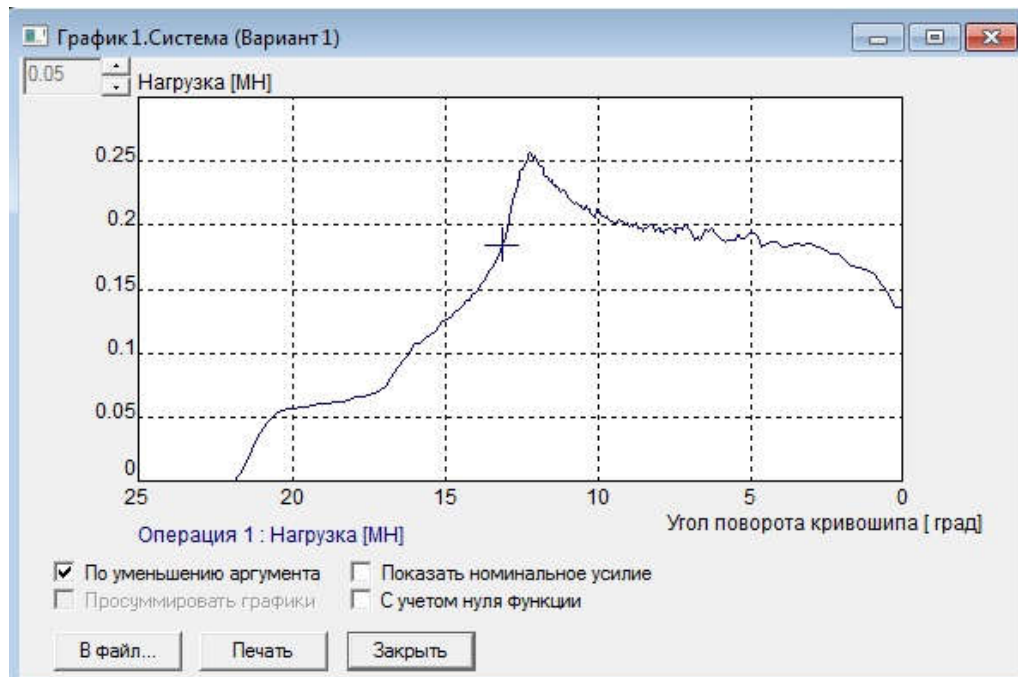
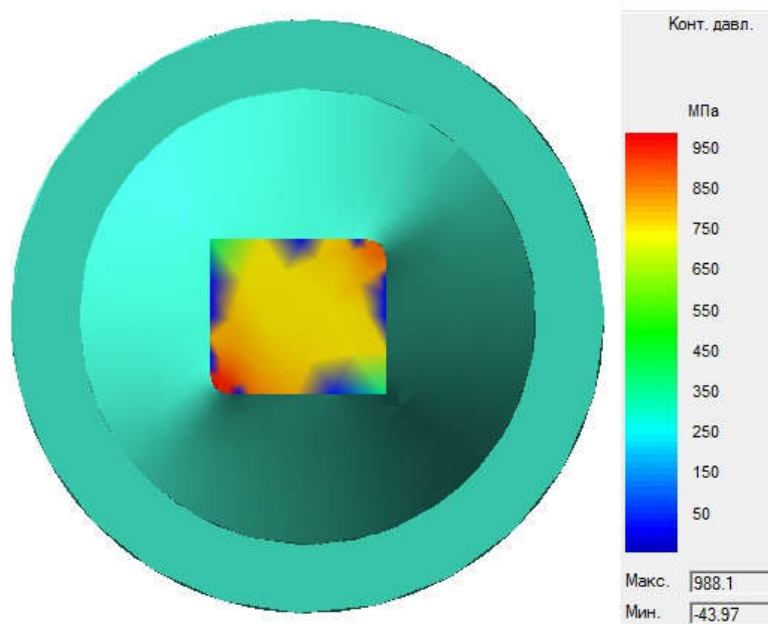
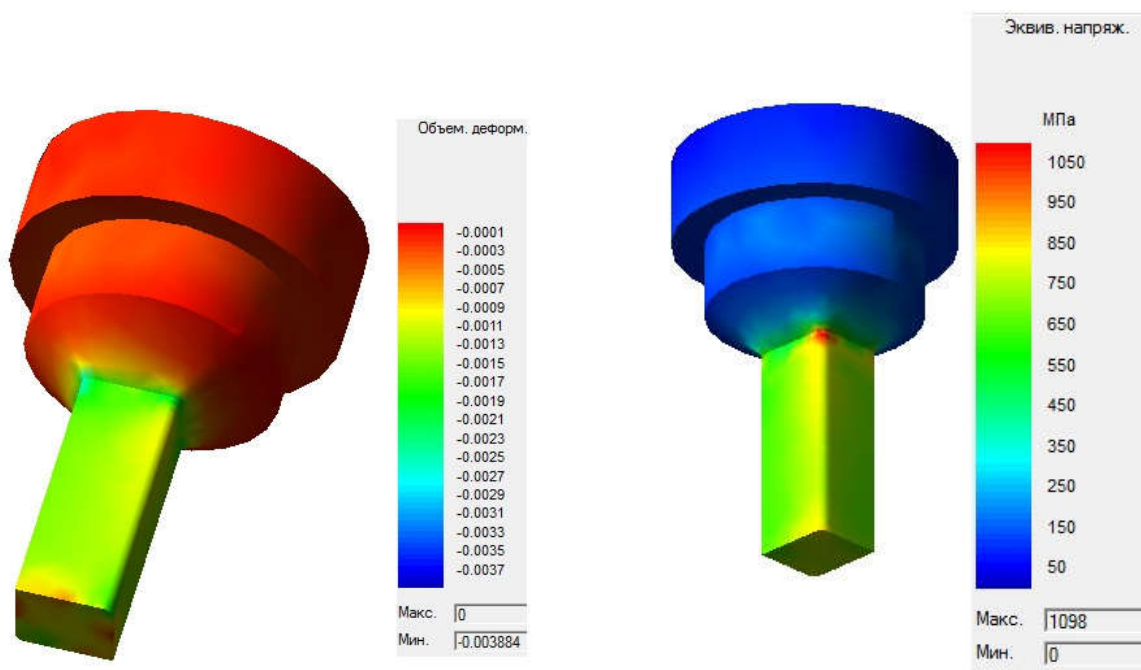


Рисунок 3.28 – Графік залежності зусилля видавлювання від кута повороту кривошипу пресу при температурі нагрівання $t 900^{\circ}\text{C}$

Також було змодельовано деформуючий інструмент при видавлюванні. Граничні параметри та спосіб закріплення обирався так само, як і в розділі 3.1.1 (див. рис. 3.14). На рис. 3.29-3.30 представлено відповідні розрахунки для пуансона та матриці.



a

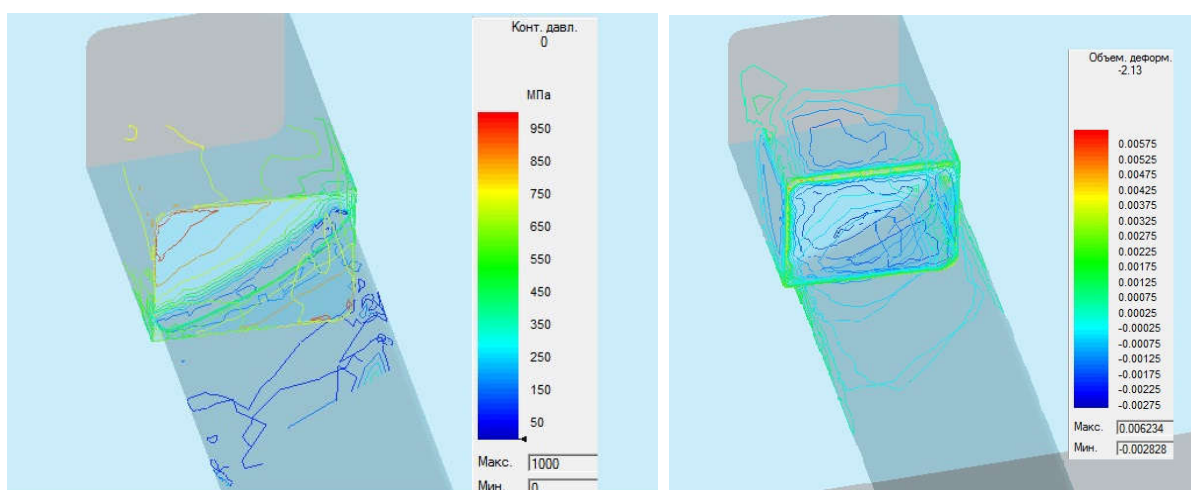
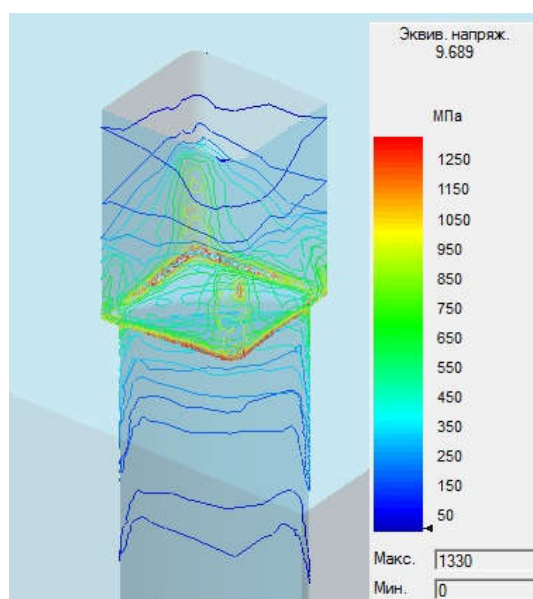


б

в

a – контактний тиск; *б* – об’ємна деформація; *в*- еквівалентні напруження

Рисунок 3.29 – Розрахунок напружень на пуансоні при видавлюванні заготовки на механічному пресі при температурі нагрівання t 900°C

*а**б**в*

а – контактний тиск; *б* – об'ємна деформація; *в*- еквівалентні напруження

Рисунок 3.30 – Розрахунок напружень в порожнині матриці при видавлюванні заготовки на механічному пресі при температурі нагрівання $t\ 900^{\circ}\text{C}$

Із аналізу напружень на пуансоні видно, що на контактній поверхні максимум спостерігається в радіусах закруглень бічних ребер і сягає максимуму $988\ \text{МПа}$ (мінімум становить $-43,97\ \text{МПа}$). Максимальна об'ємна

деформація на пуансоні – у кутах бічних ребер, концентрується на контактній поверхні із заготовкою. Еквівалентне напруження – 1098 МПа – концентрується у критичній точці з'єднання консольної частини із основою.

Із аналізу напружень в порожнині матриці максимальні контактні напруження спостерігаються, так само, як і в пуансоні, в радіусах закруглень бічних ребер і сягає максимуму 1000 МПа . Що стосується об'ємної деформації в матриці та контактних напружень, критичних значень не спостерігаємо. Еквівалентні напруження максимальні у бічних ребрах контейнеру в місцях радіусів округлення і становлять 1330 МПа , але окрім цього з'являються критичні значення напружень у вхідній зоні матриці.

Порівнюючи характер напружень на інструменті із відповідними напруженнями, зробленими раніше, можна відзначити, що взагалі напруження мають менші значення, що пояснюється більшою пластичністю металу та меншим опором деформуванню.

3.2.5 Моделювання процесу деформування при температурі $t = 1000^\circ\text{C}$

Для моделювання розрахунку задамо наступні параметри (рис. 3.31):

- виду процесу – деформація у механічному пресі зусиллям $6,3 \text{ МН}$;
- задача моделювання – тривимірна із моделюванням інструменту;
- додаткові операції – час охолодження на повітрі 3 с , час охолодження в штампі 3 с ;
- кінцева відстань між інструментами – 10 мм ;
- параметри заготовки – модель матеріалу ВТ6, температура нагрівання 1000°C ;
- параметри інструменту (Пуансон) – модель матеріалу 5ХНМ, температура підігрівання 300°C , матеріал мастила «gw-cu-h»;

- параметри інструменту (Матриця) – аналогічно пуансону.

Отчет о результатах моделирования

файл: I:\Мои модели\Моделирование\04.12.18_2 моделируется ин-т\04.12.18_2.qfm
 Вариант: Вариант 1
 Комментарий к варианту:

Операция 1	Механический пресс		
Тип:	Трёхмерная деформация		
Оборудование	80MN		
файл геометрии:	I:\Мои модели\Модель для QForm\модель 04.12.18.shl		
Время охлаждения на воздухе, с:	3		
Время охлаждения в инстр-те, с:	3		
Температура заготовки, С:	1000		
Конечное расстояние, мм:	10		
Материал заготовки:	GOST\vt6.mp		
Характеристика инструментов:			
Номер	Температура, С	Смазка	Материал
1	300	qw-cu-h.lp	5XNM.mp1
2	300	qw-cu-h.lp	5XNM.mp1

Рисунок 3.31 - Звіт про результати моделювання та параметри процесу при температурі t 1000°C

Після розрахунку отримуємо дані щодо кінематики плин у металу заготовки у порожнині матриці. На рис. 3.32 зображено характеристику розподілення температурного поля в заготовці по завершенню процесу.

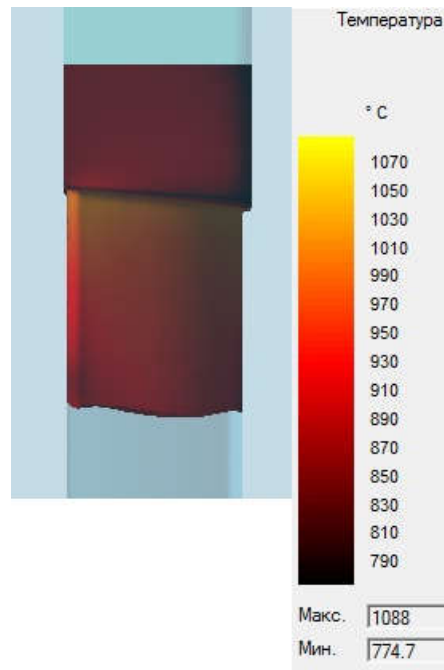


Рисунок 3.32 – Температурне поле заготовки після її видавлюванні за температури 1000°C

Із аналізу видно, що температура підіймається до 1088°C в західній зоні матриці, що відбувається внаслідок деформаційного розігрівання при видавлюванні; на площині контакту пуансону із заготовкою температура падає до $774,7^{\circ}\text{C}$.

На рис. 3.33 представлено середні напруження у заготовці лопатки після видавлювання. Видно, що напруження змінюють свій знак, що характеризується зміною самої деформації від стискання у прес-залишку ($-749,9 \text{ МПа}$) до розтягання у зоні пера ($30,13 \text{ МПа}$), що характерно для всіх процесів прямого видавлювання.

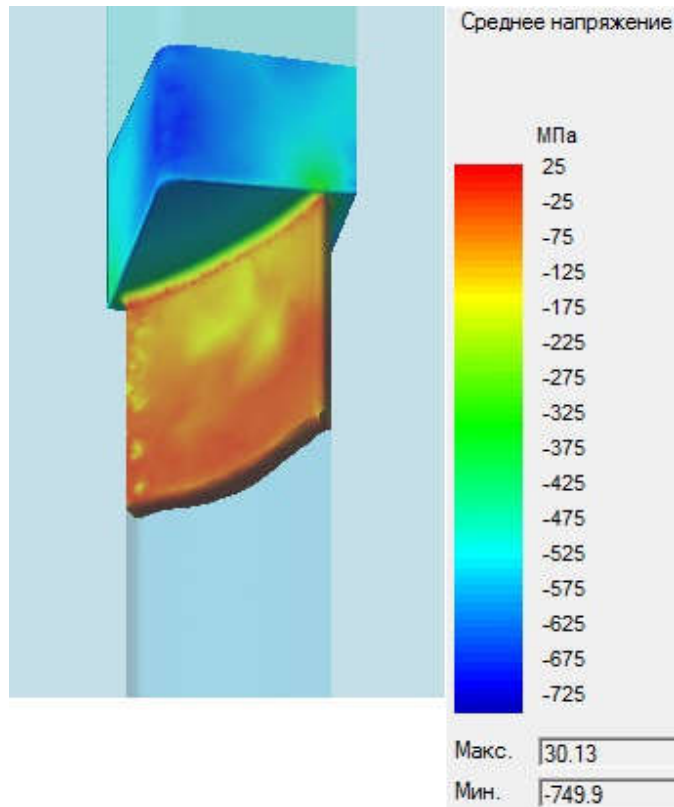
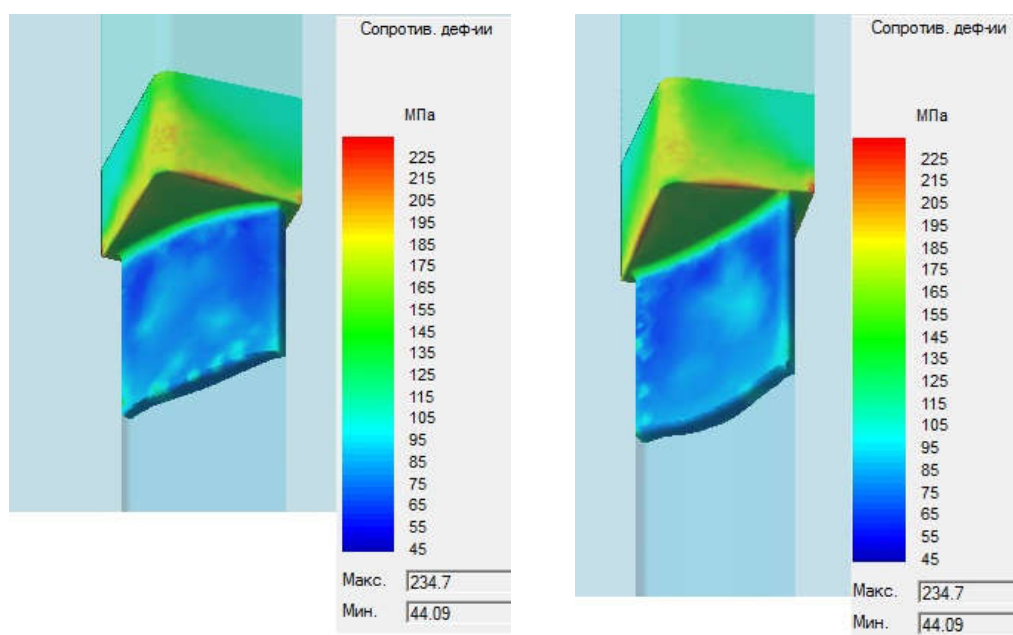


Рисунок 3.33 – Середнє напруження у видавленій заготовці лопатки при температурі 1000°C

На рис. 3.34 представлено опір деформуванню заготовки лопатки в кінцевій стадії деформування зі сторони спинки та корита. Його значення коливаються в межах 44,09...234,7 МПа. Максимальні значення спостерігаються у прямих кутах бічних граней контейнеру матриці. Опір деформуванню нижчий, ніж при температурі t 850°C.



а

б

а – зі сторони спинки; *б* – зі сторони корита

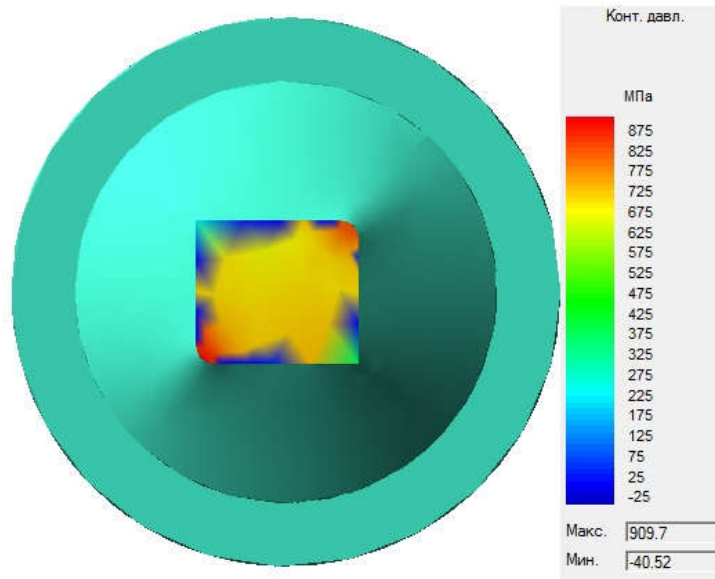
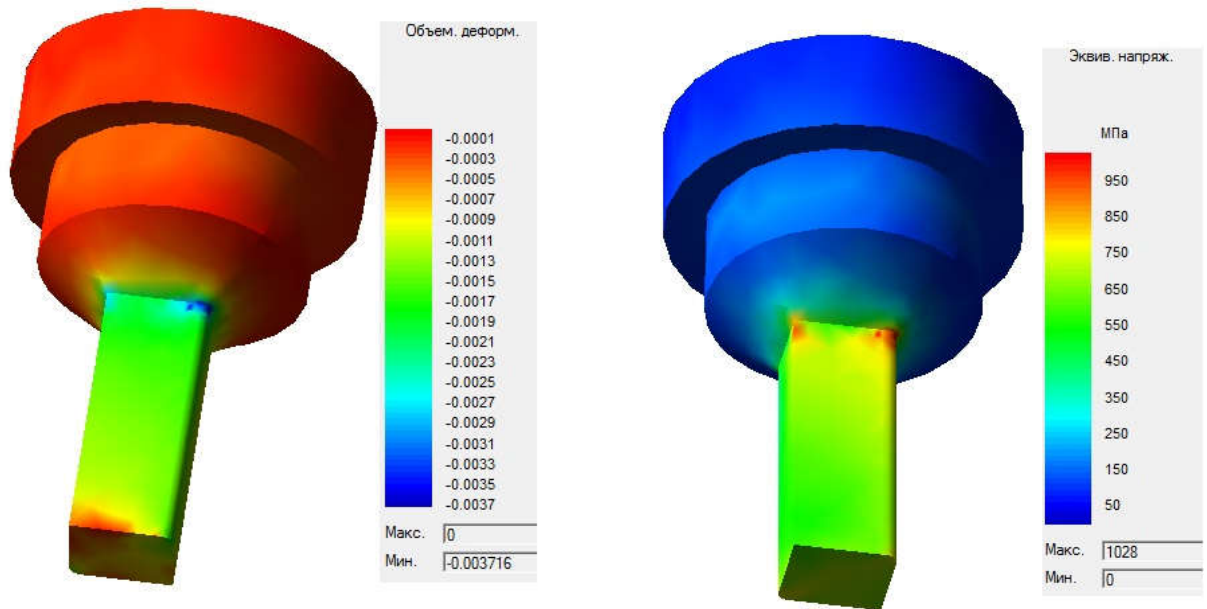
Рисунок 3.34 – Опір деформуванню заготовки лопатки в кінцевій стадії деформування при температурі $t\ 1000^{\circ}\text{C}$

На рис. 3.35 зображено розподіл зусилля видавлювання при температурі $t\ 1000^{\circ}\text{C}$ в залежності від кута повороту кривошипу преса. Аналогічно, як і для попередніх випадків, спостерігаємо характер кривої, лише максимальне зусилля дещо знижується до $0,18\ \text{MN}$.



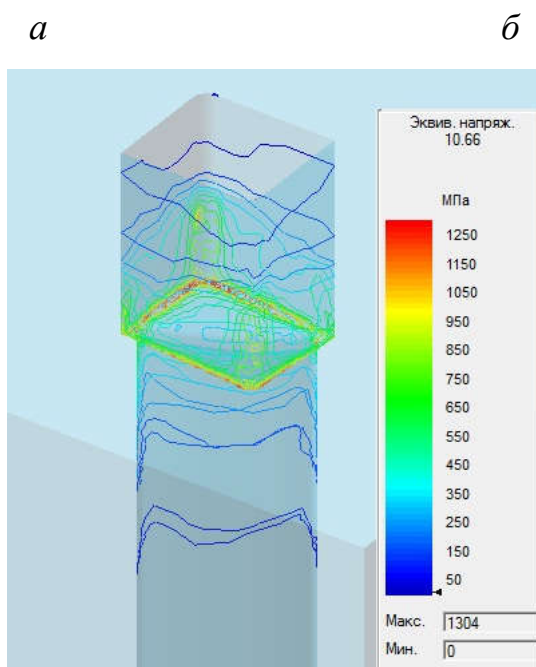
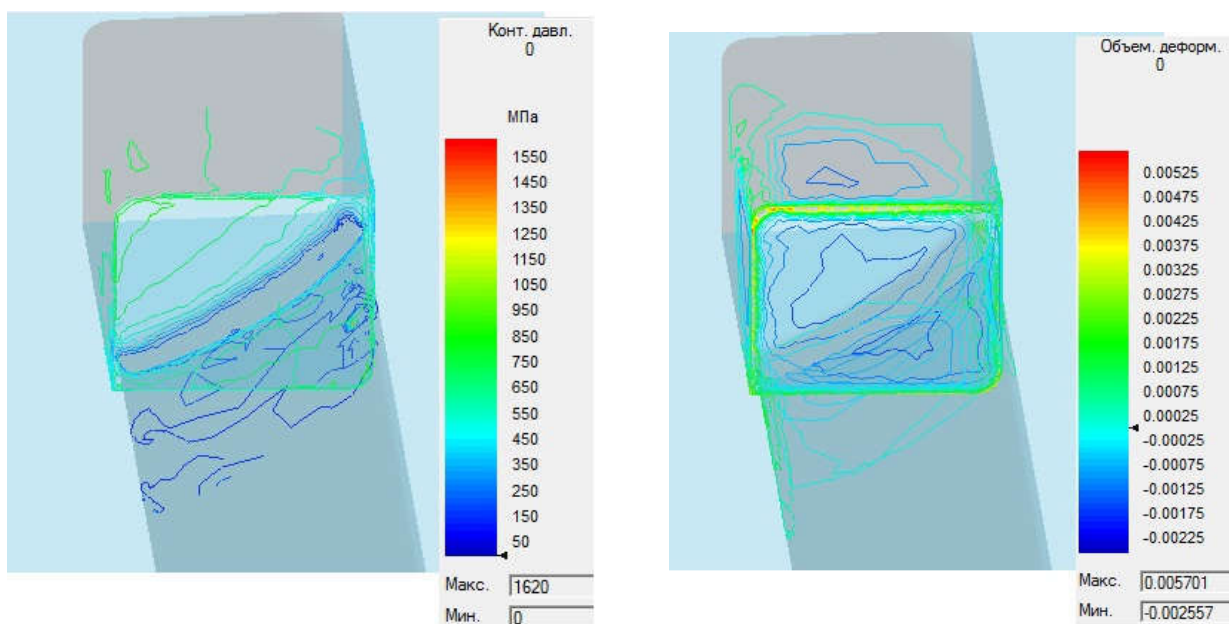
Рисунок 3.35 – Графік залежності зусилля видавлювання від кута повороту кривошипу пресу при температурі нагрівання $t 1000^{\circ}\text{C}$

Також було змодельовано деформуючий інструмент при видавлюванні. Граничні параметри та спосіб закріплення обирався так само, як і в розділі 3.1.1 (див. рис. 3.14). На рис. 3.36-3.37 представлено відповідні розрахунки для пуансона та матриці.

*a**б**в*

a – контактний тиск; *б* – об’ємна деформація; *в*- еквівалентні напруження

Рисунок 3.36 – Розрахунок напружень на пуансоні при видавлюванні заготовки на механічному пресі при температурі нагрівання t 1000°C



а – контактний тиск; *б* – об’ємна деформація; *в*- еквівалентні напруження

Рисунок 3.37 – Розрахунок напружень в порожнині матриці при видавлюванні заготовки на механічному пресі при температурі нагрівання $t 1000^{\circ}\text{C}$

Із аналізу напружень на пуансоні видно, що на контактній поверхні максимум спостерігається в радіусах закруглень бічних ребер і сягає максимуму $909,7 \text{ МПа}$ (мінімум становить $-40,52 \text{ МПа}$). Максимальна об'ємна деформація на пуансоні – у кутах бічних ребер, концентрується на контактній поверхні із заготовкою. Еквівалентне напруження – 1028 МПа – концентрується у критичній точці з'єднання консольної частини із основою.

Із аналізу напружень в порожнині матриці максимальні контактні напруження спостерігаються, так само, як і в пуансоні, в радіусах закруглень бічних ребер і сягає максимуму 1620 МПа , що значно вище, ніж при видавлюванні за температури $t 900^\circ\text{C}$. Що стосується об'ємної деформації в матриці та контактних напружень, критичних значень не спостерігаємо. Еквівалентні напруження максимальні у бічних ребрах контейнеру в місцях радіусів округлення і становлять 1304 МПа , так само, як і при видавлюванні за температури $t 900^\circ\text{C}$, але окрім цього з'являються критичні значення напружень бічних гранях із радіусом в контейнері матриці.

Порівнюючи характер напружень на інструменті із відповідними напруженнями, зробленими раніше, можна відзначити, що напруження в матриці мають більші значення, внаслідок чого можуть з'являтися руйнування інструменту у критичних перерізах. Отже, деформація за даної температури є недоцільною.

3.3 Моделювання процесу видавлювання заготовки компресорної лопатки на гідравлічному пресі при температурі $t 850^\circ\text{C}$

Для моделювання розрахунку задамо наступні параметри (рис. 3.38):

- виду процесу – деформація на гідравлічному пресі зусиллям 8 МН ;
- задача моделювання – тривимірна із моделюванням інструменту;

- додаткові операції – час охолодження на повітрі 3 с, час охолодження в штампі 3 с;
- кінцева відстань між інструментами – 10 мм;
- параметри заготовки – модель матеріалу ВТ6, температура нагрівання 850°C;
- параметри інструменту (Пуансон) – модель матеріалу 5ХНМ, температура підігрівання 300°C, матеріал мастила «gw-cu-h»;
- параметри інструменту (Матриця) – аналогічно пуансону.

Отчет о результатах моделирования			
Файл: I:\Мои модели\Моделирование\07.12.18_6\07.12.18_6.qfm			
Вариант:		Вариант 1	
Комментарий к варианту:			
Операция 1		Гидравлический пресс	
Тип:		Трёхмерная деформация	
Оборудование		5000	
Файл геометрии: C:\Users\user\Desktop\модель 04.12.18.shl			
Время охлаждения на воздухе, с:		3	
Время охлаждения в инстру-те, с:		3	
Температура заготовки, С:		850	
Конечное расстояние, мм:		10	
Материал заготовки:		GOST\vt6.mp	
Характеристика инструментов:			
Номер	Температура, С	Смазка	Материал
1	300	qw-cu-h.lp	5XNM.mp1
2	300	qw-cu-h.lp	5XNM.mp1

Рисунок 3.38 - Звіт про результати моделювання та параметри процесу на гідравлічному пресі при температурі t 1850°C

Після розрахунку отримуємо дані щодо кінематики плинну металу заготовки у порожнині матриці. На рис. 3.39 зображено характеристику розподілення температурного поля в заготовці по завершенню процесу.

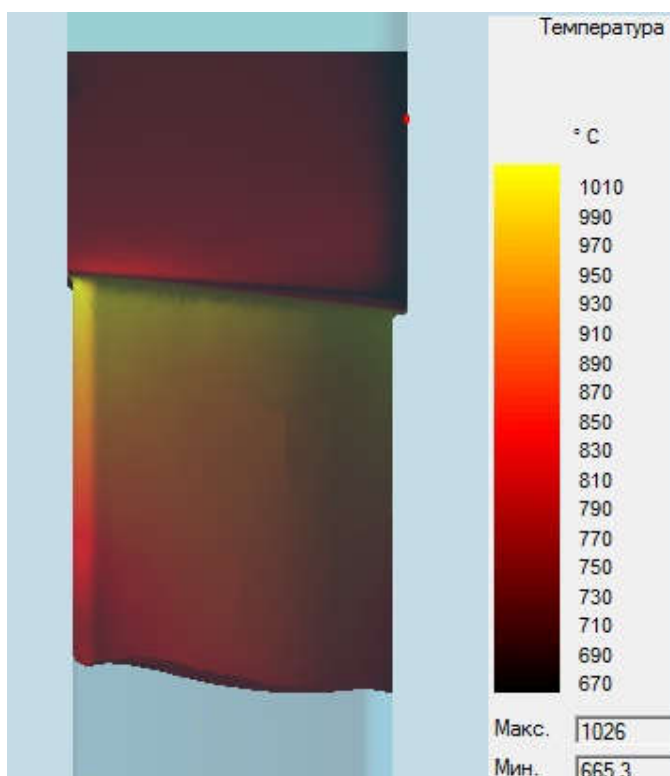


Рисунок 3.39 – Температурне поле заготовки після її видавлюванні на гідравлічному пресі за температури 850°C

Із аналізу видно, що температура підіймається до 1010°C в західній зоні матриці, що відбувається внаслідок деформаційного розігрівання при видавлюванні; на площині контакту пуансону із заготовкою температура падає до 665,3°C.

На рис. 3.40 представлено середні напруження у заготовці лопатки після видавлювання. Видно, що напруження змінюють свій знак, що характеризується зміною самої деформації від стискання у прес-залишку (-1550 МПа) до розтягання у зоні пера (-50 МПа), що характерно для всіх процесів прямого видавлювання.

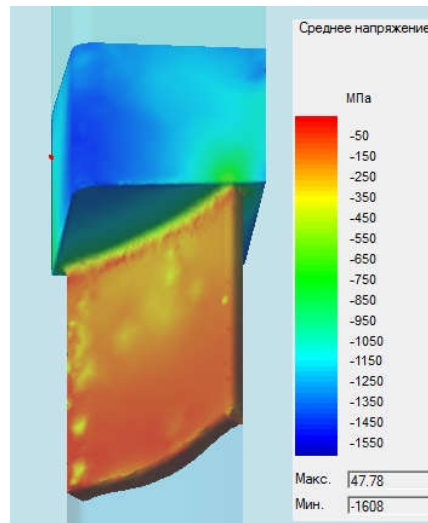
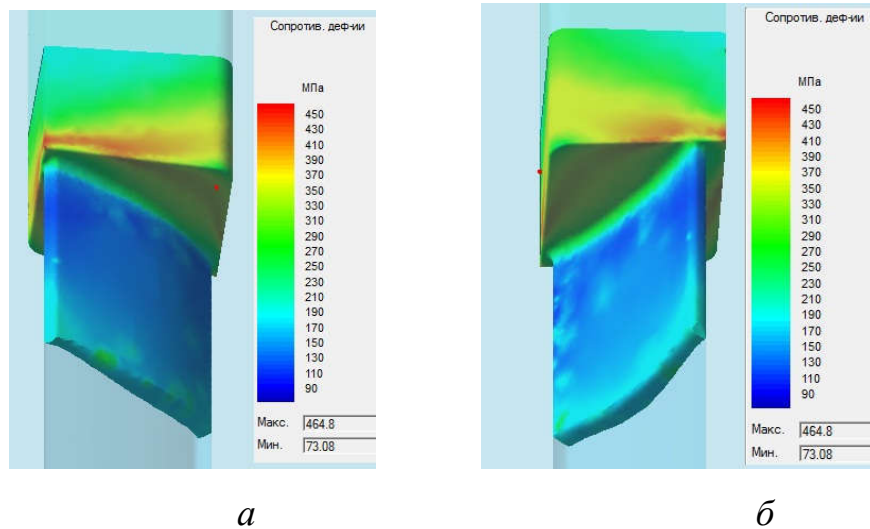


Рисунок 3.40 – Середнє напруження у видавленій заготовці лопатки при видавлюванні на гідравлічному пресі за температури 850°C

На рис. 3.41 представлено опір деформуванню заготовки лопатки в кінцевій стадії деформування зі сторони спинки та корита. Його значення коливаються в межах 73,08...464,8 МПа. Максимальні значення спостерігаються у прямих кутах бічних граней контейнеру матриці.



а – зі сторони спинки; *б* – зі сторони корита

Рисунок 3.41 – Опір деформуванню заготовки лопатки в кінцевій стадії деформування на гідравлічному пресі при температурі t 850°C

На рис. 3.42 зображено розподіл зусилля видавлювання на гідравлічному пресі при температурі $t\ 850^{\circ}\text{C}$ в залежності від ходу траверси. Максимальне зусилля становить $0,28\ \text{MN}$.

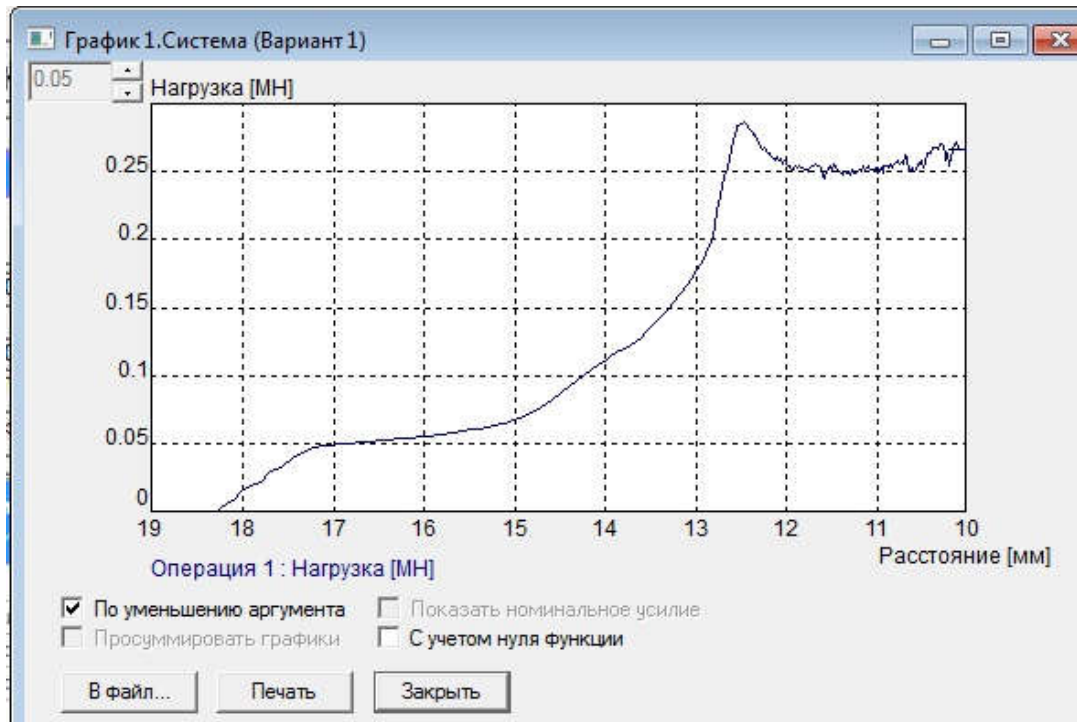
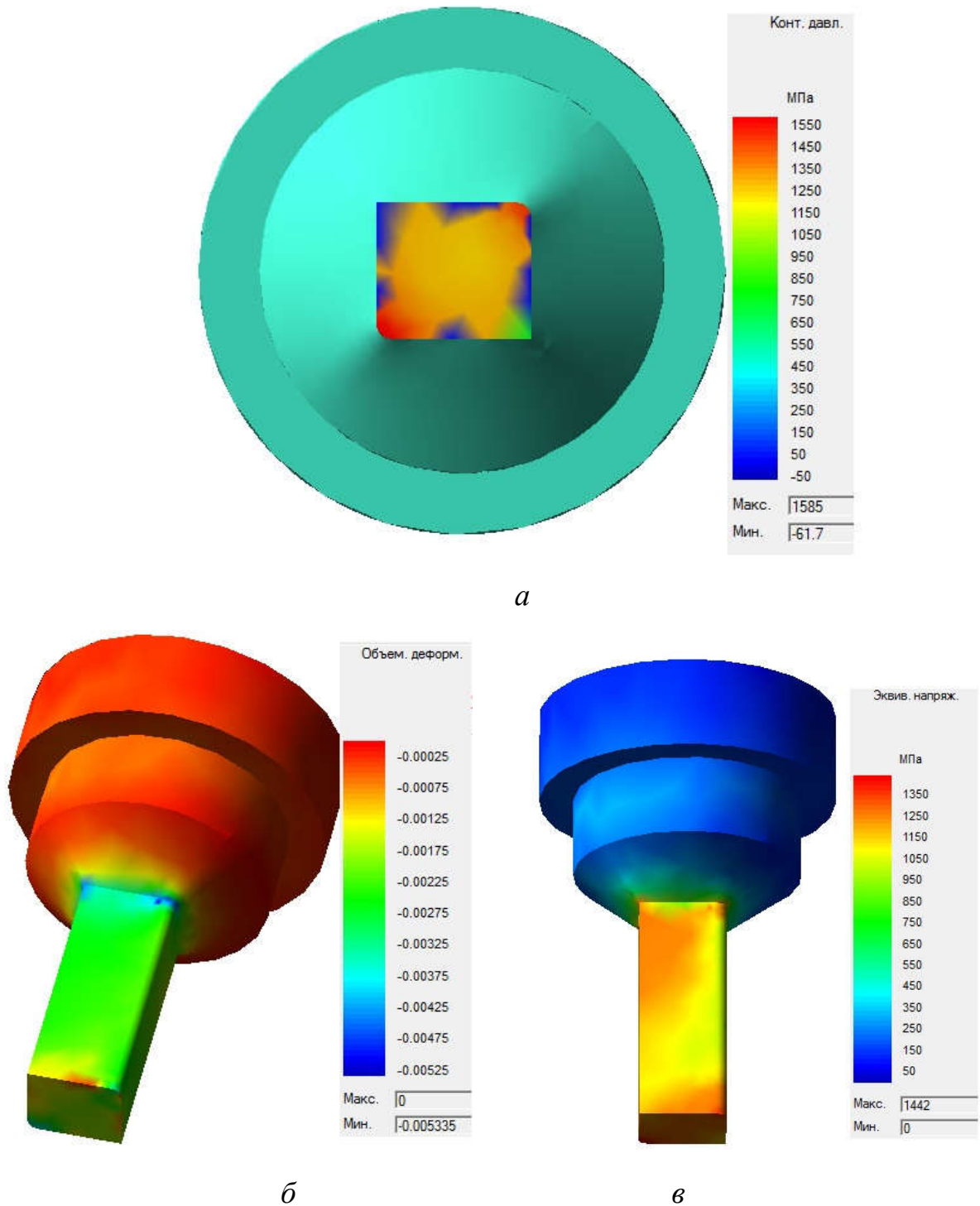


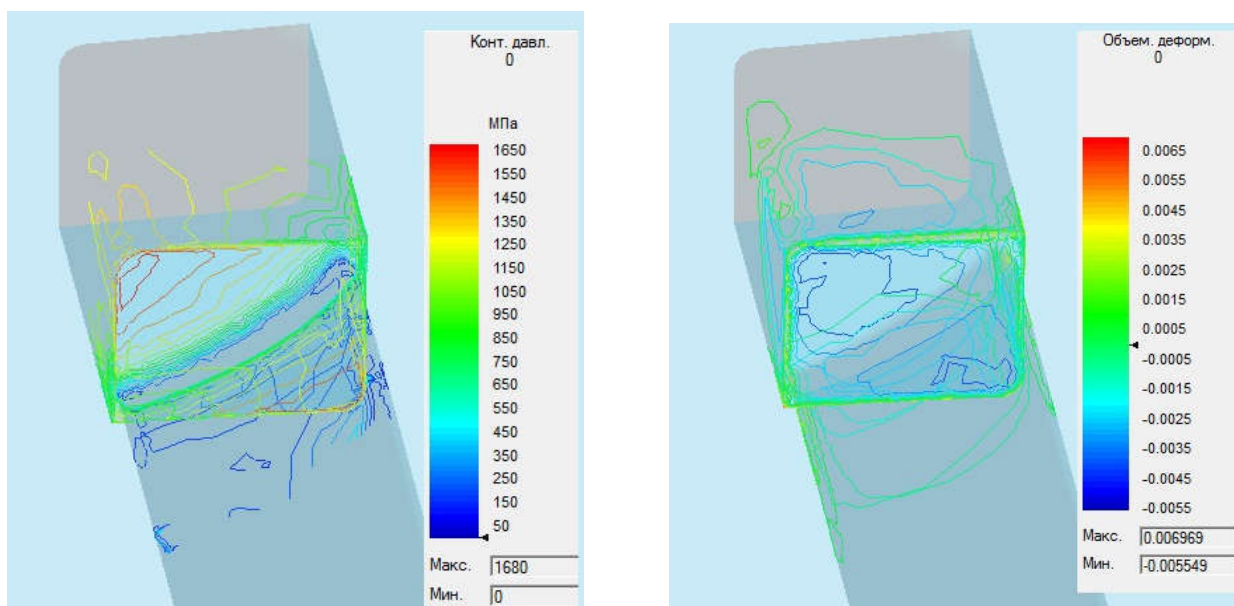
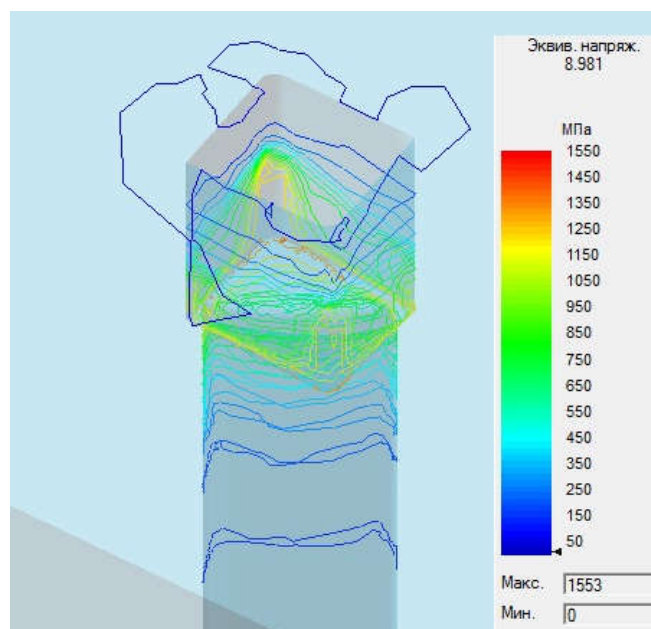
Рисунок 3.42 – Графік залежності зусилля видавлювання на гідравлічному пресі при температурі $t\ 850^{\circ}\text{C}$ в залежності від ходу траверси

Також було змодельовано деформуючий інструмент при видавлюванні. Граничні параметри та спосіб закріплення обирався так само, як і в розділі 3.1.1 (див. рис. 3.14). На рис. 3.43-3.44 представлено відповідні розрахунки для пуансона та матриці.



a – контактний тиск; *б* – об’ємна деформація; *в*- еквівалентні напруження

Рисунок 3.43 – Розрахунок напружень на пуансоні при видавлюванні заготовки на гідравлічному пресі при температурі нагрівання $t = 850^{\circ}\text{C}$

*а**б**в*

а – контактний тиск; *б* – об'ємна деформація; *в*- еквівалентні напруження

Рисунок 3.44 – Розрахунок напружень в порожнині матриці при видавлюванні заготовки на гідравлічному пресі при температурі нагрівання t 850°C

Із аналізу напружень на пуансоні видно, що на контактній поверхні максимум спостерігається в радіусах закруглень бічних ребер і сягає максимуму 1585 МПа (мінімум становить $-61,7 \text{ МПа}$). Максимальна об'ємна деформація на пуансоні – у кутах бічних ребер, концентрується на контактній поверхні із заготовкою. Еквівалентне напруження – 1442 МПа – концентрується у критичній точці з'єднання консольної частини із основою.

Із аналізу напружень в порожнині матриці максимальні контактні напруження спостерігаються, так само, як і в пуансоні, в радіусах закруглень бічних ребер і сягає максимуму 1680 МПа . Що стосується об'ємної деформації в матриці та контактних напружень, критичних значень не спостерігаємо. Еквівалентні напруження максимальні у бічних ребрах контейнеру в місцях радіусів округлення і становлять 1553 МПа , але окрім цього з'являються напруження на зовнішній поверхні матриці, що не характерно при видавлюванні на механічному пресі.

Порівнюючи характер напружень на інструменті із відповідними напруженнями, зробленими раніше, можна відзначити, що напруження в матриці мають більші значення, внаслідок чого можуть з'являтися руйнування інструменту у критичних перерізах.

4. ОХОРОНА ПРАЦІ І НЕБЕЗПЕКА В НАДЗВИЧАЙНИХ СИТУАЦІЯХ

У дипломному проекті надані основні заходи з охорони праці при холодному та гарячому пластичному деформуванні виробів типу лопаток.

4.1 Аналіз потенційних небезпек

1. Можливість отримання механічних травм при холодному деформуванні:

а) недосконалість конструктивних рішень кріплення штампів на технологічному обладнанні, зокрема, ненадійність кріплення штампів та їх вузлів до пресу;

б) недосконалість конструкцій штампів, зокрема, відсутність зазорів безпеки між рухомими та нерухомими частинами штампів;

в) відсутність технологічних отворів або інших конструктивних елементів для безпечного розміщення заготовок у штампі та безпечного вилучення деталей із них;

г) відсутність атестації штампів та їх маркування за ступенем безпеки;

д) відсутність надійних огорожень зони деформування;

е) відсутність захисних пристроїв запобігання аварійних ситуацій;

ж) порушення правил з охорони праці при виконанні операцій формозмінювання;

з) можливість отримання механічних травм внаслідок гострих кромок, задирок на отриманих деталях або розсипання стосу заготовок.

2. Можливість отримання механічних травм при гарячому деформуванні:

- а) незадовільна підготовка робочого місця;
- б) незадовільний стан ручного інструменту;
- в) протікання або розлив масла з гідравлічної системи;
- г) порушення технологічного процесу;
- д) відсутність або невикористання індивідуальних засобів захисту.

3. Незадовільна професійна підготовка фахівців, що може призвести до порушень вимог технологічного процесу та правил з охорони праці і, як наслідок, до травматизму або професійних захворювань.

4. Незадовільна організація робочого місця може бути пов'язана з недостатнім врахуванням вимог ергономіки, захаращеністю робочої зони та нерациональним розташуванням технологічного обладнання.

5. Можливість ураження електричним струмом. Головними причинами ураження можуть бути: невиконання правил електробезпеки, несправність енергоспоживаючого обладнання, наприклад, поява напруги на неструмоведучих частинах обладнання, внаслідок обриву захисного заземлення або занулення, що може призвести до електричних травм або летального наслідку.

6. Небезпеки, що пов'язані з використанням природного газу при обігріві нагрівальних печей - можливість загорянь або вибухів, забруднення повітря робочої зони продуктами спалювання.

7. Втрата герметичності газопроводів, що подають природний газ до нагрівальних печей, причинами якої є механічне ушкодження газопроводів, невиконання регламенту перевірки герметичності, що може призвести до витоку газу, як наслідок загорянь або вибуху.

8. Негативний вплив теплового випромінювання від поверхонь тепловипромінюючого технологічного обладнання, через отвори нагрівальних печей та від нагрітих заготовок та поковок. Інтенсивність теплового потоку від нагрівальних печей становить близько $2,1 \text{ кВт/м}^2$, в

робочій зоні пресів і молотів – $1,4 \text{ кВт/м}^3$ та в місцях складування заготовок - $0,75 \text{ кВт/м}^3$.

9. Термічні опіки внаслідок випадкового торкання нагрітих поверхонь обладнання, деталей або заготовок.

10. Важкість праці – це характеристика трудового процесу, яка обумовлена навантаженням на кістково-м'язовий апарат, серцево-судинну, дихальну та інші системи організму людини.

11. Напруженість праці – це характеристика трудового процесу, яка зумовлює навантаження на центральну нервову систему, органи почуття та емоційний стан людини.

12. Незадовільні параметри повітряного середовища в робочій зоні, причинами яких є незадовільна робота систем опалення та повітрообміну, що може призвести до зниження комфортності праці та загальних захворювань.

13. Незадовільне освітлення робочої зони, що може бути пов'язано з виходом з ладу освітлювальних приладів або надмірної їх забрудненості. Це може призвести до погіршення зору, погіршення здатності розрізнявати об'єкти, а внаслідок і до травмування.

14. Вібрація, причинами якої є робота деталей та вузлів технологічного обладнання для деформування. Амплітуда коливань шабота молоту досягає $7...8 \text{ мм}$, фундаменту молота – $0,56...0,08 \text{ мм}$. Термін дії вібрації на коваля дорівнює $7,5...10$ періодам коливань фундаменту. Загальний термін дії вібрації залежить від кількості ударів, що припадають за зміну. Наприклад, кількість ударів пневматичних молотів за хвилину становить $95...210$, штампувальних молотів $3000...5500$ ударів за зміну. Крім цього між двома послідовними ударами окремого молота в робочій зоні сприймаються до 5 ударів сусідніх молотів.

15. Підвищений рівень шуму, що пов'язано з роботою технологічного обладнання для гарячого деформування та дробоструминного очищення поверхні деталей після гарячого пластичного деформування.

16. Можливість загорянь, причинами яких є порушення правил пожежної безпеки, виток горючих робочих газів, коротке замикання.

17. Неправильні дії персоналу в умовах надзвичайних ситуацій різного характеру, причинами яких є непідготовленість персоналу до дій в умовах НС, низька ефективність управління в цих умовах, що може призвести до тяжких травм або летального наслідку.

4.2 Заходи по забезпеченню безпеки

1. До механічних при холодному деформуванні

У конструкції штампів повинні бути передбачені зазори безпеки між рухомим елементом штампу та нерухомим. Величина зазорів неменше 25 мм при нижньому положенні повзуна. Для безпечної подачі та видалення заготовки зі штампу повинні бути передбачені технологічні отвори для зручного користування пінцетом або кліщами.

При неможливості виконання цих вимог повинно бути передбачено використання захисних огорож. Функціями яких мають бути: виключення можливості потрапляння рук працюючого у небезпечну зону, виключення травмування працюючого самою захисною огорожею. Конструкція огорожі повинна давати можливість безпечного обслуговування штампу.

При неможливості використання захисних пристроїв дворучне керування пресом є обов'язковим.

Для автоматичної зупинки роботи пресу у разі відхилення від нормального режиму (заклинювання пуансону, потрапляння в зону штампування сторонніх об'єктів, подвійний удар) передбачені запобіжні пристрої. До таких пристроїв належать:

- обмежувачі ходу, упори, кінцеві вимикачі, гальмівні пристрої;

- елементи конструкції обладнання типу «слабка ланка», зокрема, різні штифти, шпонки, фрикційні муфти, плавкі запобіжники;
- блокуючи пристрої, які можуть бути механічними, електромеханічними, фотоелектричними;
- сигналізуючи пристрої, які надають інформацію про виконання процесу або у разі прояву відхилень вказують на місце їх прояву. Такі пристрої зазвичай є частиною електричних схем ланцюгів управління обладнанням.

Попереджувальними заходами можуть бути постійний контроль з боку керівників та представників профспілок, стимулювання бездоганного виконання правил з охорони праці.

Заходами захисту мають бути: використання індивідуальних засобів захисту:

- спеціальний одяг ГОСТ 12.4.221-2002 ССБТ;
- спеціальне взуття ГОСТ 12.4050-78 ССБТ;
- спеціальні рукавиці ГОСТ 12.4.010-75 ССБТ;
- окуляри захисні ГОСТ 12.4.035-78 ССБТ.

2. До механічних при гарячому деформуванні згідно ДСТУ 32.73-95 «Безпечність промислових підприємств. Загальні положення та вимоги».

Перед початком роботи персонал повинен підготувати належним чином робочу зону та робоче місце.

Розташування матеріалів, тари із заготовками, деталями і відходами має бути зручним для їх переміщення по технологічному ланцюгу.

Місце машиніста молота або преса має бути достатньо освітленим для постійного спостереження за ходом процесу. Якщо при управлінні машиніст може працювати сидячи, робоче місце згідно ГОСТ 12.2.049-80 потрібно забезпечити зручним сидінням і підставкою для ніг.

Біля технологічного обладнання мають бути спеціальні пристрої для зберігання інструменту.

Для охолодження інструменту в процесі роботи має бути встановлений бачок з холодною водою. Робоча зона огорожується суцільними металевими щитами для попередження розльоту часток металу та окалини.

Ручний інструмент повинен відповідати наступним вимогам: рукоятки ударного інструменту виготовляються з твердої деревини, мають бути прямими, овальної форми у перерізі. Клини для кріплення ударної частини виготовляються з низько вуглецевої сталі з насічками. Зазор між рукоятками кліщів у зведеному стані повинен бути не менше 35 мм.

Вимірювальний інструмент і шаблони повинні мати таку форму та розміри, що запобігають внесенню рук виконавця в зону руху бойка або пуансону при попередньому вимірюванні розмірів деталі.

Перед виключенням пресу або молоту проводиться перевірка працездатності систем управління, налаштування запобіжних пристроїв, зокрема наявність та надійність кріплення захисних кожухів та частинах технологічного обладнання, що обертаються або переміщуються, наявність мастила у вузлах тертя, відсутність тріщин та надійність кріплення бойків, працездатності гальмівного механізму.

При роботі на гідравлічних молотах та пресах, де в системі використовується масло, можливе виливання певних його об'ємів на підлогу, що може призвести до падіння внаслідок підсковзування.

Одними з найбільш розповсюджених причин травматизму при гарячому деформуванні є порушення технологічного процесу, тому фахова компетенція виконавців, бездоганне виконання вимог як самого технологічного процесу, так і з охорони праці, є запорукою виключення випадків травматизму.

До найбільш важливих з цих вимог можна віднести наступне:

- подача нагрітих заготовок від нагрівальної печі до пресу або молоту повинно здійснюватись тільки з використання спеціальних захватів і тільки за визначеними маршрутами, уникаючи проходів та робочих зон іншого обладнання;

- перед виконанням першого удару слід переконатися у належному розміщенні нагрітої заготовки на нижньому бойку або на посадочній площадці, відсутності сторонніх предметів в зоні деформування. Перший удар повинен бути менш потужним;

- не допускати ударів бойка по ручному інструменту, а положення інструменту повинно бути з боку тулуба;

- дотримуватись температурного режиму деформування: кування перегрітих заготовок або заготовок, що мають недостатню температуру неприпустимо;

- нахил заготовки при куванні в положення на себе неприпустимий;

- при обрубці задирок положення поковки повинно забезпечити виліт задирок в сторону, де виключено травмування людей.

3. Щодо професійної підготовки фахівців

- до робіт допускаються особи не молодше 18 років, що пройшли медичний огляд та отримали допуск до робіт;

- до робіт залучаються особи, що отримали певні знання за спеціальністю, які підтверджуються документом встановленого зразка.

4. Щодо незадовільної організації робочого місця, ГОСТ 12.2.032-84

- площа на одного працюючого не менше $4,5 \text{ м}^2$;

- висота робочої зони від підлоги до стелі не менше $3,2 \text{ м}$;

- об'єм, що припадає на одного працюючого, не менше 15 м^3 .

Розташування тепловипромінюючого обладнання повинно виконуватися з урахуванням потоків повітря при використанні природної або штучної загальнообмінної вентиляції.

Головним положенням стандартів є те, що конструктивні та ергономічні особливості робочого місця мають забезпечувати безперешкоджувальне та зручне виконання всіх робочих операцій. Кольорове рішення технологічного обладнання повинно відповідати вимогам ГОСТ 12.4.026-76 «Цвета сигнальные и знаки безопасности».

5. Щодо захисту ураження електричним струмом

Основними заходами захисту мають бути:

5.1. Організаційні:

- до виконання робіт допускаються особи віком не молодше 18 років, що пройшли навчання та перевірку знань з електробезпеки згідно ДНАОП 1.1.10 – 1.01 - 2000 «Правила безпечної експлуатації електроустановок – споживачів» та отримали допуск з електробезпеки відповідної групи;
- електрообладнання виробничих діляниць повинно відповідати вимогам НПАОН 40.1-1.21-98 «Правила безопасной эксплуатации электроустановок потребителей» та ін. діючим нормативним актам;
- експлуатацію і ремонт електроустановок повинен здійснювати спеціально підготовлений персонал;
- для кожного електроспоживаючого обладнання повинні бути складені експлуатаційні схеми нормальної і аварійної роботи. В електричних схемах повинні бути передбачені захисні електроприймачі від перевантажень і коротких замикань;
- всі не ізольовані токопровідні елементи електрообладнання повинні бути надійно огорожено суцільними огороженнями, зняття або відкриття можливе тільки за допомогою спеціальних пристроїв;
- розташування струмоведучих частин на недоступній висоті. Висота розташування визначається значенням напруги: при напрузі до 1000 В – не менше 3,5 м, при напрузі більше 1000 В – не менше 6 м.

5.2. Технічні:

- використання електроізоляції. Стан ізоляції характеризується рівнем електричної опору. Встановлено, що опір ізоляції електричних дротів повинен бути не менше 0,5 МОм. Одним із найбільш ефективних захисних заходів є подвійна електроізоляція;
- використання електричного блокування. Функції блокуючих пристроїв – запобігання небезпечним діям людини. Блокування поділяється на:

- електричне блокування – здійснює розрив ланцюга спеціальними контактами;
- механічне блокування – розрив ланцюга у механічний спосіб. Вимоги до блокуючих пристроїв визначені ГОСТ 12.4.155 – 85 «ССБТ. Устройства защитного отключения. Классификация. Общетехнические требования.»;

- пристосування захисного заземлення або занулення – навмисного електричного з'єднання металевих частин обладнання, що не проводять струм, але можуть опинитися під напругою, із землею або із захисним нульовим дротом. Принцип дії захисного заземлення або занулення полягає у зниженні до безпечних значень напруги дотику, яка обумовлена замиканням на корпус. Електрообладнання необхідно заземлювати або занулювати у відповідності з ПУЕ -2009 «Правила улаштування електроустановок»;

- електричне розділення мережі на окремі електрично незв'язані між собою ділянки;

- ввімкнення джерел живлення технологічного обладнання здійснюється тільки через рубильник.

6. Природний газ

У цілях безпеки на газопроводах необхідно встановлювати вимикаючі пристрої (затвори). Найбільш надійними є подвійні затвори. Конструктивно вони являють собою дві паралельно встановлені засувки, між якими встановлена свіча, яка виведена вище крівлі будівлі.

Безпосередньо на нагрівальних печах, з метою виключення зворотнього викиду полум'я, встановлені водяні затвори, котрі конструктивно собою являють вигнуту U-подібну трубку заповнену у згині водою.

Для контролю наявності природного газу та продуктів його згоряння у робочій зоні нагрівальних печей необхідно встановити сигналізуючі газоаналізатори типу ЩИТ-1, ЩИТ-2 або ЩИТ-3. При спалюванні 1м³ природного газу утворюється NO 0,21г, CO 5,2г. У робочу зону потрапляє близько 10% загальної кількості шкідливих речовин, що виділяються при

згорянні палива. Основою функцією газоаналізатора є фіксація перевищення кількості природного газу або водню відносно допустимих концентрацій із видачею звукового та світлового сигналу про небезпеку.

Для видалення небезпечних речовин із робочої зони необхідно використовувати місцеву механічну витяжну вентиляцію типу «зонт» у відповідності із СНиП 2.04.05.–91 «Отопление, вентиляция и кондиционирование воздуха. Нормы проектирования», встановлену над отвором печі.

7. Теплове випромінювання:

- спеціального одягу згідно ГОСТ 12.4.045 – 87 «Костюмы мужские для защиты от повышенных температур. Технические условия»;
- рукавиць згідно ГОСТ 12.4.010 – 75 «ССБТ. Средства индивидуальной защиты. Рукавицы специальные. Технические условия.»;
- каски захисні

Групові засоби захисту:

- повітряні завіси між джерелами теплового випромінювання та зонами, де знаходяться робітники;
- забезпечення водно-сольового режиму.

4.3 Заходи по забезпеченню виробничої санітарної та гігієни праці

1. Для мінімізації шкідливого фактору, такий як важкість праці виробничого процесу передбачено:

- застосування засобів механізації та автоматизації виробничих процесів;
- застосування оптимального розподілу робочого часу та перерв (5-10 хв на 1 год).

2. Освітлення робочої зони

Для забезпечення необхідного рівня виробничого освітлення слід дотримуватися вимог ДБН В.2.5-28-2006 «Природне і штучне освітлення. Норми проектування» з урахуванням характеру зорової роботи.

4.4 Заходи з пожежної безпеки

Для попередження пожежі та вибухів на ділянках передбачені такі заходи наявності первинних засобів пожежогасіння, зберігання легкозаймистих речовин у герметично закритій тарі або у витяжних шафах.

В комплексі заходів, що використовуються в системі протипожежного захисту, важливе значення має вибір найбільш раціональних способів та засобів гасіння різних горючих речовин матеріалів згідно зі СНиП 2.01.02-85 «Противопожарные нормы проектирования зданий и сооружений»

4.5 Заходи по забезпеченню безпеки у надзвичайних ситуаціях

Інженерно-технічні заходи від впливу електромагнітного імпульсу на елементи виробництва.

Ядерний вибух має декілька вражаючих факторів, які впливають на людей та механізми. Ці фактори складаються зі світлового випромінювання, ударної хвилі та електромагнітного імпульсу, окрім цього - радіоактивне враження.

Електромагнітний імпульс супроводжує ядерний вибух у вигляді короткого імпульсу, який вражає електричну та електронну апаратуру.

Особливість електромагнітного імпульсу полягає в його здатності поширюватися на десятки кілометрів в оточуючому середовищі та по різних комунікаціям.

В мережах електропостачання виникають перевантаження, які викликають пробій ізоляції обмоток електродвигуна, міжфазне коротке замикання, замикання на корпус, пробій ізоляції проводів, які підключають двигун до мережі.

Ступінь ушкодження залежить від амплітуди наведеного імпульсу напруги або струму та електричної міцності обладнання. Особливо незахищеним до впливу електромагнітного імпульсу є апаратура на напівпровідниках. Електромагнітний імпульс випалює елементи електросхем, викликає коротке замикання, іонізацію діелектриків.

Електромагнітний імпульс вражає також резистори, викликає іскріння у меж контактних з'єднаннях. Це призводить до нагрівання та пошкодження опору поверхні, що буває небезпечно.

Електромагнітний імпульс ядерного вибуху вражає електротехнічні пристрої керування електродвигуном, тому необхідно вірно оцінити ймовірність пошкодження наявних схем і систем внаслідок дії електромагнітного імпульсу (ЕМІ).

ВИСНОВКИ

Проведені дослідження свідчать про те, що раціональною температурою нагрівання заготовок для видавлювання є 850...900°C, так як при нижчій температурі утруднюється характер плинину металу заготовки, збільшуються середні напруження та опір деформуванню. При нагріванні вихідної заготовки до вищої температури додатково з'являються критичні перерізи у важкозаповнюваних радіусах контейнера матриці (рис. 3.27, 3.24) при загальному зниженні показників середнього напруження та опору деформування.

Аналізуючи напруження на матриці також видно, що при підвищенні температури заготовки до 1000°C середні напруження різко зростають у 1,5 рази, при тому, що за температури 800...900°C вони повільно знижуються. Також різко зростає контактний тиск. Крім того, з'являються критичні напруження у західній зоні матриці.

Із аналізу напружень на пуансоні видно, що підвищення температури заготовки не має негативного впливу.

Крім того, відомо, що перед деформуванням заготовки на неї наносять тонкий шар мідного покриття. При підвищенні температури її нагрівання можливе часткове оплавлення мідного шару, що сприятиме налипанню титану на інструмент при деформації та низькій стійкості інструменту.

Порівнюючи процес видавлювання заготовки при температурі 850°C на механічному та гідравлічному пресах, можна зробити висновок про те, що зменшення швидкості деформації (на гідравлічному пресі) хоча і покращує плин металу, але значно збільшує напруження за всіма параметрами. Так середні напруження у заготовці зростають майже у два рази, опір деформуванню збільшується. Контактний тиск на пуансоні та матриці збільшується у 1,5 рази, еквівалентні напруження також зростають у 1,2 рази.

Це свідчить про те, що тривалий контакт нагрітого металу заготовки з інструментом значно знижує його стійкість.

Отже, раціональною температурою нагрівання вихідної заготовки для видавлювання заготовки компресорної лопатки є температура 850...900°C, обладнання – механічний прес.

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

1. Богуслаев, В.А. Технологическое обеспечение эксплуатационных характеристик деталей ГТД. Лопатки компрессора и вентилятора. Часть I: монография [Текст] / В.А. Богуслаев, Ф.М. Муравченко, П.Д. Жеманюк, В.И. Колесников и др. – Запорожье: Мотор Сич, 2003. – 396 с.
2. Богуслаев, В.А. Технология производства авиационных двигателей / В.А. Богуслаев, А.Я. Качан, В.Ф. Мозговой, Е.Я. Корневский – Запорожье: Изд. ОАО «Мотор Сич», 2004. – 945 с.
3. Галиев, В.Э. Перспективный технологический процесс изготовления прецизионных компрессорных лопаток [Текст] / В.Э. Галиев, Д.З. Фаткуллина // Вестник Умский государственный авиационный технический университет. – 2014. - № 3 (64). –С.97 – 105.
4. Демин, Ф.И. Технология изготовления основных деталей газотурбинных двигателей [Текст] / Ф.И. Демин, Н.Д. Проничев, И.Л. Шитарев; под общ. ред. проф. Ф.И. Демина. – 2-е изд. – Самара: Изд-во СГАУ, 2012. – 321 с.
5. Крымов, В.В. Производство лопаток газотурбинных двигателей [Текст] / В.В. Крымов, Ю.С. Елисеев, К.И. Зудин. – М.: Машиностроение-Полет – 2002. – 376 с.
6. Пат. 298883 Россия. Способ изготовления лопатки компрессора [Текст] / Д.В. Зиновьев, С.А. Пичужкин, А.В. Клементьев, В.С. Стогов Заявитель и патентообладатель ОАО «НПО «Сатурн». – № 2012125689; заявл. 19.06.2012; опубл. 20.11.2013, Бюл. № 32. –С. 6.
7. Никольский, Л.А. Горячая штамповка заготовок из титановых сплавов [Текст] / Л.А. Никольский. - М., Машиностроение. - 1964. – 227 с.
8. Богуслаев, В.А. Точная горячая штамповка деталей ГТД [Текст] / В.А. Богуслаев, Ю.С. Кресанов, А.Я. Качан, В.В. Клочихин и др.- Запорожье. – 2017.- 563 с.

9. Кресанов, Ю.С. Периодическая прокатка заготовок лопаток компрессорагазотурбинных двигателей с аэродинамическим профилем [Текст] / Ю.С. Кресанов, А.В. Богуслаев, А.Я. Качан // Вестник двигателестроения. – 2006. - №2. – С. 95-101.

10. Кресанов, Ю.С. Влияние процессов точной штамповки и холодного вальцевания пера рабочих лопаток компрессора из жаропрочных сплавов на качество их изготовления [Текст] / Ю.С. Кресанов, А.В. Богуслаев, А.Я. Качан и др. // Вестник двигателестроения. – 2010. - №1. – С. 60-71.

11. Пат. 298885 Россия. Способ изготовления лопатки компрессора [Текст] / Д.В. Зиновьев, С.А. Пичужкин, А.В. Клементьев, В.С. Стогов заявитель и патентообладатель ОАО «НПО «Сатурн». – № 2012125689; заявл. 19.06.2012; опубл. 20.11.2013, Бюл. № 32. –С. 6.

12. Особенности технологии обработки компрессорных лопаток турбореактивных двигателей [Текст]. - науч. журн. «Металлообработка и станкостроение». - Москва, - 2010. - №4.

13. Сиротенко, Л.Д. Применение биметаллических материалов в машиностроении [Текст] / Л.Д. Сиротенко, Е.С. Шлыков, Т.Р. Абляз // Современные проблемы науки и образования. – 2015. – № 2-1

14. Рогов, В.А. Технология конструкционных материалов. Нанотехнологии: учебник [Текст] / В.А.Рогов. – М.: Юрайт. - 2016. – 190 с.

15. Галиев, В.Э. О проблемах и перспективах изготовления прецизионных компрессорных лопаток [Текст] / В.Э. Галиев, Д.З. Фаткуллина, Д.Р. Таминдаров. - МГТУ. – ISSN1994-0408. – 2014. – 25 с.

16. Кресанов, Ю.С. Влияние параметров горячего выдавливания заготовок рабочих лопаток компрессора на качество их изготовления [Текст] / Ю.С. Кресанов, А.Я. Качан, В.В. Чигиринский, А.Н. Бень // Вестник двигателестроения. – Запорожье. – 2009. – №2. – С. 108-115.

17. Чигиринский, В.В. Исследование течения металла при выдавливании заготовок компрессорных лопаток [Текст] // Обработка

материалов давлением / В.В. Чигиринский, А.Н. Бень, Ю.С. Кресанов. - №1 (34). – 2013. – С. 100-105.

18. Титов, В.А. Особенности процессов формообразования заготовок лопаток из титанового сплава системы Ti-TiVn [Текст] / В.А. Титов, А.Я. Качан., О.Г. Моляр., Ю.С. Кресанов., Н.К. Злочевська // Вестник НТУУ «КПИ». Серия «Машиностроение». – 2011. №61. С. 95-100.

19. Ковка и штамповка: Справочник. В 4-х т. [Текст] / Ред. Совет: Е.И. Семенов и др. – М.: Машиностроение, 1985 – т.2. Горячая штамповка/ под ред. Семенова. - 1985г., 592 с.

20. Сторожев, М.В. Теория обработки металлов давлением [Текст] / М.В. Сторожев, Е.А. Попов. – М: Машиностроение. - 1977. – 422 с.

21. QForm 2D/3D. Программа моделирования объемной штамповки. Руководство пользователя 3D моделирование [Текст]. – ООО «КванторФорм». – 1991-2008.

22. Кутыкова, А.С. Исследование процесса прямого выдавливания титанового сплава в программном пакете QForm 2D/3D [Текст] / А.С. Кутыкова. – Рыбинск.

23. Козаков, Р.А. Моделирование изотермической штамповки лопатки компрессора газотурбинного двигателя [Текст] / Р.А. Козаков // Кузнечно-штамповочное производство. ОМД. – 2011. - №5. – С. 39-42.

24. Вакалов А.А. Применение компьютерного моделирования при разработке процессов горячей штамповки поковок лопаток [Текст] / А.А. Вакалов // Кузнечно-штамповочное производство. ОМД. – 2012. - №1. – С. 36-41.

25. Биба Н.В. QForm – универсальная и эффективная программа для моделированияковки и штамповки / Н.В. Биба, С.А. Стебунов, Ю.А. Гладков и др. // Кузнечно-штамповочное производство. ОМД. – 2011. - №1. – С. 36-42.

26. Осипенникова О.Г. Компьютерное моделирование процессов обработки металлов давлением [Текст] / О.Г. Осипенникова, М.В. Бубнов,

Д.В. Капитаненко // Сб. «Авиационные материалы и технологии» - М.: ВИБМ. – 2012. – С. 141-147.

27. Ben A. The Computer Modeling of the Technological Process of Compressor Blade Blanks Extrusion [Text] / XIX International Scientific Conference “New Technologies and Achievements in Metallurgy, Material Engineering, Production Engineering and Physics”. A collective monograph edited by Marcin Knapieńcki – Series: Monograph №78. – Częstochowa, 2018. – P. 139-142.