

В.А.Тігов<sup>1</sup>, д-р техн.наук, проф., О.Я.Качан<sup>2</sup>, д-р техн.наук, проф., О.Г.Моляр<sup>3</sup>, канд.техн.наук, ст.наук.співр., Ю.С.Кресанов<sup>4</sup>, канд.техн.наук, ст.наук.співр., Н.К.Злочевська<sup>1</sup>, асистент.  
1 – Національний технічний університет України "КПІ", м. Київ, Україна; 2 - Запорізький національний технічний університет, м. Запоріжжя, Україна; 3 - Інститут металофізики НАН України, м. Київ, Україна  
4 - ВАТ «Мотор Січ», м. Запоріжжя, Україна

## ОСОБЛИВОСТІ ПРОЦЕСІВ ФОРМОУТВОРЕННЯ ЗАГОТОВОК ЛОПАТОК З ТИТАНОВОГО СПЛАВУ СИСТЕМИ Ti – TiB<sub>2</sub>

*Проведено експериментальні дослідження особливостей формоутворення заготовок лопаток з титанових сплавів системи Ti – TiB<sub>2</sub>. Отримані дані про вплив товщини мідного шару, температури деформації, матеріала матриці на якість поверхні заготовки. Досліджено структуру титанового сплаву VT-8 і титанового сплаву з евтектикою TiB<sub>2</sub> при пресуванні, оцінено вплив течення основного металу на фазові включення.*

*Experimental investigations of forming features of blade's blanks made from alloy system Ti – TiB<sub>2</sub> are carried out. The data of influence of thickness of copper layer, temperature of deformation, die material on blank are obtained. The structure of titanium alloy VT-8 and titanium alloy with eutectic TiB<sub>2</sub> in press forming are studied. The influence of flow of main material on phase inclusions is estimated.*

### Постановка науково-технічної задачі

Процес пресування заготовок лопаток (ЗЛ) з титанових сплавів має широке використання в промисловості тому, що забезпечує необхідні точність, шорсткість та механічні властивості матеріалу пера лопатки. Виготовлення заготовок робочих лопаток компресора методом гарячого ізотермічного пресування забезпечує якість для наступного холодного вальцювання таким чином, що надалі механічна обробка пера лопатки не проводиться [1].

В процесі пресування титанових сплавів VT8, VT3-1 та інших виникають труднощі, що пов'язані з їх високою адгезією, налипання на стінки матриці, появі дефектів на поверхні пера ЗЛ.

Підвищення ефективності експлуатації лопаток може бути вирішено за рахунок підвищення механічних властивостей титанових сплавів, таких як, евтектичні сплави системи Ti –TiB<sub>2</sub>. Однак наявність твердої і крихкої складової евтектики TiB<sub>2</sub> при формоутворенні визначає додаткові труднощі. Ці труднощі пов'язані з додатковою абразивною взаємодією евтектики з робочою поверхнею оснастки та руйнуванням боридної складової, що може привести до руйнування на границі борид-титановий сплав [2, 3, 4].

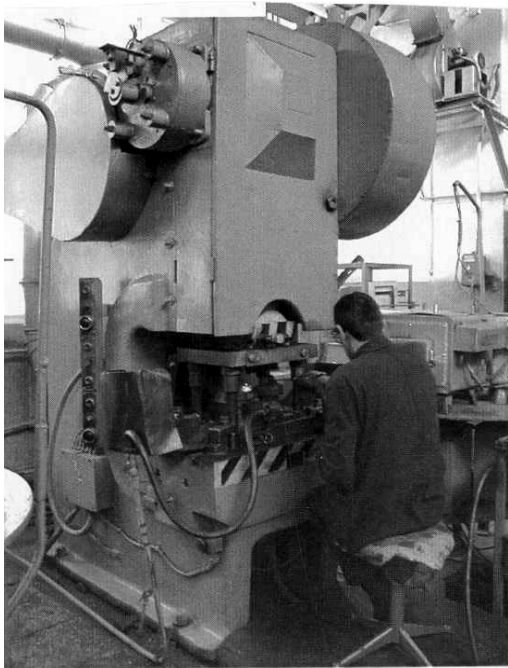


Рис. 1. Прес та оснащення для пресування



Рис. 2. Роз'ємні напівматриці для пресування заготовок робочих лопаток

**Мета роботи**

Експериментально дослідити особливості формоутворення ЗЛ з титанового сплаву системи Ti – TiVn в процесі ізотермічного пресування.

**Зміст та результати дослідження**

Дослідження по ізотермічному пресуванню заготовок робочих лопаток компресора авіаційного двигуна проводилось на кривошипному одностійковому пресі зусиллям 1000 кН/ Фотографія робочого місця з пресом наведена на рис. 1.

Ізотермічне пресування заготовок робочих лопаток з розвиненим хвостовиком виконували з титанового сплаву Ti – TiVn. Пресування відповідно до серійного процесу проводили з використанням серійного оснащення у різних матрицях, які показані рис. 2.

При пресуванні на поверхні заготовок лопаток спостерігається утворення поздовжніх рисок. Це підвищує шорсткість поверхні і не дозволяє забезпечити якість виготовлення лопаток при наступному холодному вальцюванні пера. Основною причиною утворення рисок на поверхні пера ЗЛ були частки титанового сплаву, що налипли на штамп в процесі пресування, внаслідок високої адгезії титану та мають високу твердість внаслідок наклепу. Тому заготовки перед видавлюванням покривали захисним шаром гальванічної міді, що являється додатковим змащенням і виключає в складних умовах деформації схоплювання основного матеріалу з матеріалом інструменту [1].

В ході виконання досліджень процесу ізотермічного пресування робочих лопаток заготовки виготовляли з титанового сплаву системи Ti – TiV<sub>2</sub> евтектичного складу (бор -1,55%, Ti - залишок), що відповідає об'ємному вмісту TiV<sub>2</sub> приблизно 10%. Механічні властивості вихідного матеріалу:  $\sigma_B=1350-1400$  МПа;  $\delta = 6-8\%$

Визначався вплив на якість виготовлення ЗЛ температури деформації, товщини мідного покриття вихідної заготовки (ВЗ) та її форми перед видавлюванням, змащення, швидкості деформування, зміцнюючих покриттів штампів та шорсткості поверхні (глибини рисок).

**Вплив температури деформації**

Дослідження проводилося по виготовленню заготовок робочих лопаток компресора авіаційного двигуна. Перед пресуванням на поверхню вихідної заготовки наносили захисний шар мідного покриття товщиною 9 – 12 мкм. Були досліджені 3 інтервали температури нагрівання вихідної заготовки: 850°C, 890°C, 930°C. Температура 890°C – температура для пресування матричного титанового сплаву, що встановлена технологічним процесом. В експерименті температуру змінювали на 40°C на пониження та підвищення.

Критерієм оцінки кожного температурного інтервалу нагрівання служили: стан поверхні пера лопатки та штампів; повнота відпресовки пера лопатки та умови заповнення радіусних ділянок хвостовика лопатки після пресування.

Характерні заготовки, що отримані в процесі експерименту наведено на фотографії (рис. 3).

Встановлено, що при температурах в інтервалі до 890°C титановий сплав Ti – TiV<sub>2</sub> має високий опір деформуванню, при якому формоутворення пера лопатки протікає не в повній мірі. При цьому радіусні ділянки хвостовика лопатки та пера лопатки не відповідають вимогам креслень.

При температурі 930°C відбувається повне заповнення по довжині пера та радіусних ділянок пера та хвостовика. Це дозволило рекомендувати температуру обробки титанового сплаву.

Якість поверхні з підвищенням температури декілька погіршується. Це пов'язане з тим, що підвищення температури нагрівання вихідної заготовки приводить до істотного окислювання мідного покриття та при пресуванні відбувається безпосередній контакт матеріалу пера лопатки з матеріалом штампів.

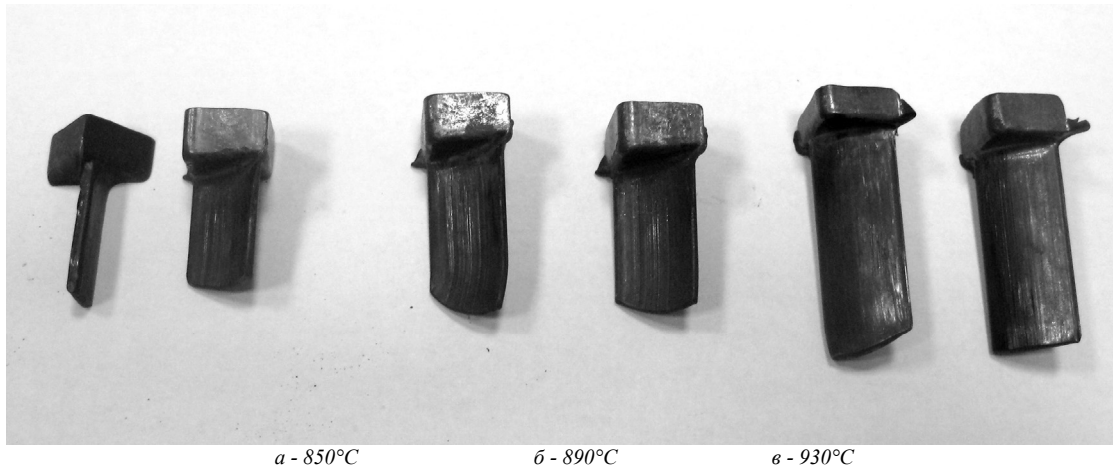


Рис. 3. Заготовки лопаток відпресовані при різних температурах

**Вплив товщини мідного покриття**

На заготовки робочих лопаток наносили мідне покриття гальванічним методом, товщиною 9...12 мкм. Вибір товщини проведено на основі результатів роботи [1]. Досліджувався вплив товщини мідного покриття та способів його нанесення на якість виготовлення. Товщина мідного покриття в межах 4...6 мкм приводить до утворення рисок уже на 5-й ЗЛ, 9...12 мкм мідного покриття - до утворення рисок на 40...50 ЗЛ, а товщина мідного покриття 20...25 мкм - до утворення рисок на 80...90 ЗЛ.

### Вплив виду змащення на процес видавлювання

Оцінка впливу змащень на стан поверхні ЗЛ проводилась як при змащенні безпосередньо ВЗ перед нагріванням, так і при змащенні матриці.

В якості змащення при гарячому пресуванні ЗЛ застосовувався шар міді товщиною 9...12 мкм, що наноситься на ВЗ гальванічним способом. Для забезпечення зчеплення міді з титаном попередньо проводилась нікель-хлориста обробка, що утворила на поверхні заготовки шар нікелю товщиною 1...2 мкм.

Недоліком застосовуваного в виробництві змащення являється залежність змащувальної здатності, від товщини шару міді та нікелю та строгості дотримання гальванічного процесу.

В процесі дослідження показана ефективність використання змащення **Графітол В2**. Використання даного змащення дозволило при товщині мідного шару 9...12 мкм забезпечити:

- зменшення дефектів на поверхні заготовки;
- підвищення стійкості робочих поверхонь оснащення;
- здійснювання багаторазового пресування деталей та полегшення видалення заготовок;
- краще заповнювання матеріалом форми матриці.

### Вплив матеріалу матриці

Одним з важливих елементів одержання необхідної шорсткості ЗЛ методом видавлювання є деформуючий інструмент.

Показано, що чим вище твердість робочої поверхні деформуючого інструмента, тим вище його зносостійкість та краще шорсткість видавлюємої поверхні ЗЛ. Матриці для видавлювання виготовляли зі сталі 4Х4ВМФС, які після термообробки мала твердість HRC 48...52. Робота матриць з такою твердістю дає дуже низьку стійкість, яка складає до 100 видавлених ЗЛ. Тому робочу частину матриці для підвищення твердості та зносостійкості наплавляли мартенситностаріючим сплавом. Після термообробки робоча частина матриці мала твердість HRC 60...65, що збільшувала стійкість інструмента в 10 разів.

Дослідження впливу товщини наплавлення мартенситностаріючого сплаву 0,5 мм та 1,0...1,5 мм показали, що товщина наплавлення 1,0...1,5 мм являється достатньою, тому що наплавлений робочий поясок надалі механічно обробляється. При товщині наплавлення 0,5 мм оголюється при доведенні перехідна зона, що має значно низьку твердість, яка дорівнює твердості основного металу матриці (HRC 48-52).

### Дослідження особливостей формування структури матеріалу при пластичному деформуванні

Металографічний аналіз виконувався на оптичному мікроскопі моделі МІ-8М, з камерою Webbers M 300. В якості реактиву, за допомогою якого виконувалося травлення шліфа зразка, використана плавикова кислота 50% концентрації. Металографічний аналіз робився для двох зразків. Зразок А виконаний з матеріалу Ti-TiN, а зразок В з титанового сплаву VT-8. Вибір для порівняння титанового сплаву VT-8 здійснено тому, що він використовується для виготовлення робочих лопаток ротора компресора авіаційних двигунів.

На рис. 4 показана схема характерних зон розвитку деформацій, які виникають при деформуванні.

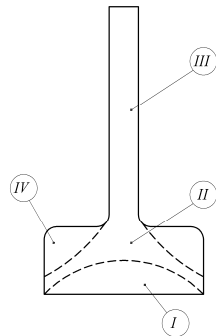


Рис. 4. Характерні зони поперечного перерізу зразка лопатки, що виникають при ізотермічному пресуванні

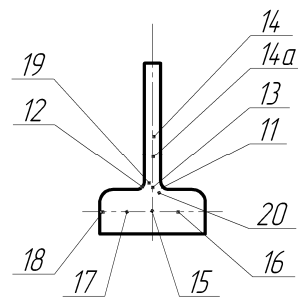


Рис. 5. Схема металографічного дослідження зразків лопаток з титанового сплаву VT-8

Площини зразка умовно можна поділити на наступні зони в залежності від характеру течії металу при пресуванні:

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

II – зона інтенсивної течії металу у порожнину пера лопатки. Максимальні лінії току є дотичними до обвідної зони I та радіусів галтелей;

III – зона сталої течії, де матеріал заповнює порожнину пера лопатки постійного поперечного перерізу;

IV – зона, що характеризується умовами гальмування течії металу.

На рис. 5 показана схема місць металографічного дослідження зразків лопаток з титанових сплавів VT-8.

В зонах I та IV течія металу утруднена, в наслідок малих деформацій структура металу рівно вісна, по характеру близька до вихідної структури (див. рис 6)

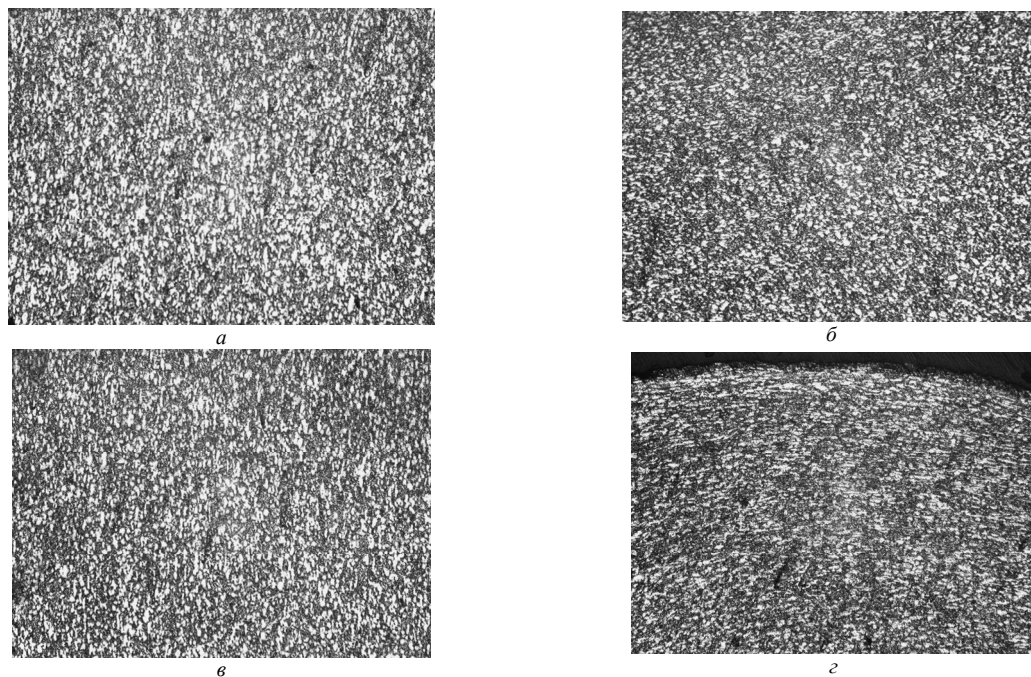


Рис. 6. Зони утрудненої деформації а, б, в – відносно ділянки 15, 16, 17, що характерні зоні I; г – ділянка 18 зоні IV

В зоні II знаходиться метал, який перетікає до пера лопатки. В наслідок інтенсивного деформування в цій зоні зерна вихідного сплаву витягуються в напрямку течії металу, що показано на рис. 7.

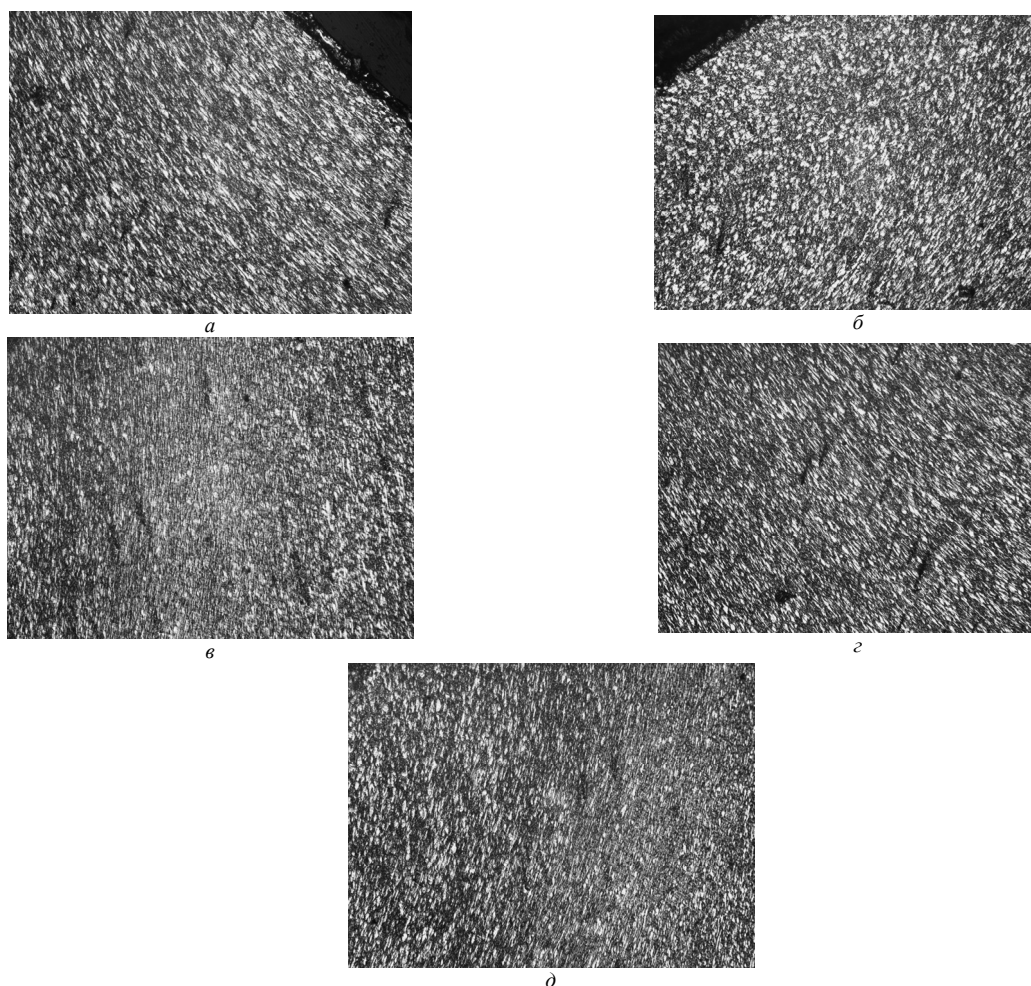


Рис. 7. Зони течії металу з замкової частини до пера лопатки а, б – радіусна частина галтелей зоні II (ділянки 11 та 12); в, г, д – перехідна зона (II –III) від замкової частини до пера лопатки (13, 19, 20)

В зоні галтелей (рис. 7 а, б) спостерігається інтенсивна течія металу до границь стінки матриці. Інтенсивність деформацій збільшується до вісі симетрії профілю пера лопатки. Швидкість течії обумовлює розтягуючі напруження, які викликають локальні місця руйнування матеріалу (див. рис 7 в, г). В наслідок ізотермічного штампування вже на вході до профілю пера локальне руйнування «зварюється» (див. рис. 7 д), а по вісі симетрії утворюється інтенсивний потік металу, який призводить до великих деформацій матеріалу та подрібнення зерна.

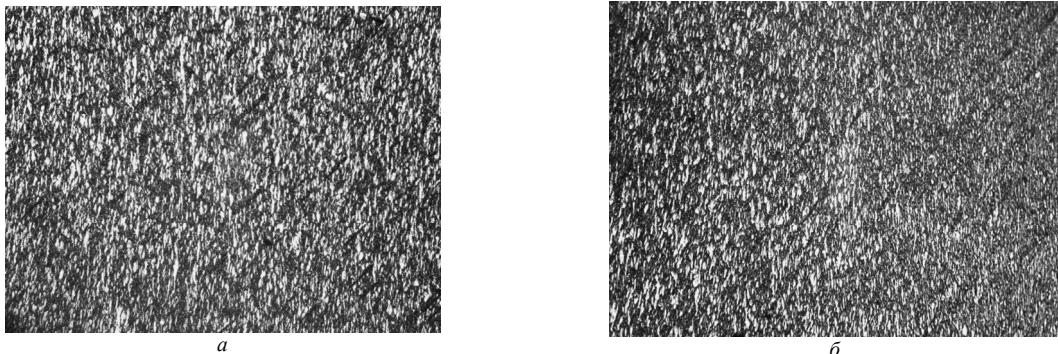


Рис. 8. Структура металу в напрямку вісі пера лопатки а, б – різні ділянки повздож вісі пера лопатки (ділянки 14 та 14а)

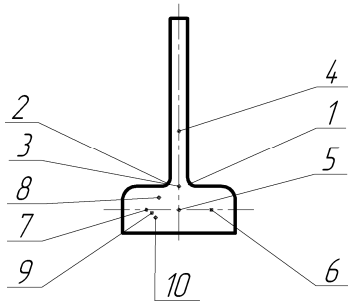


Рис. 9. Схема металографічного дослідження зразків лопаток з титанового сплаву системи Ti-TiVn

В процесі пресування при формуванні профілю пера зберігається структура, яка утворилась при вході металу з замкової частини. Вона характеризується більшим подрібненням зерна в осередку вісі симетрії та зменшенням подрібнення в крайових зонах, що показано на рис. 8.

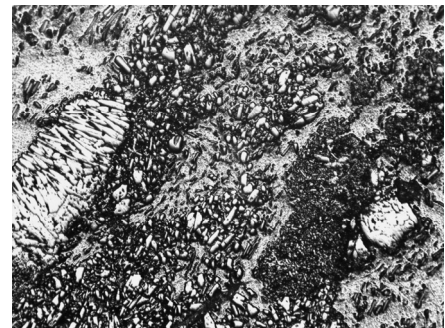
Повздож профілю пера лопатки розподіл структури матеріалу зберігається.

Технологічні особливості пресування заготовок лопаток з сплаву VT-8 були враховані при пресуванні заготовок лопаток з титанового сплаву системи Ti-TiVn. Металографічний аналіз цих штамповок проведено за схемою (див. рис. 4). При цьому металографічні дослідження були виконані для ділянок, які наведені на рис. 9

На рис. 10 наведена структура загальмованих зон течії металу. Вона близька до вихідної структури металу.



а ділянка IV

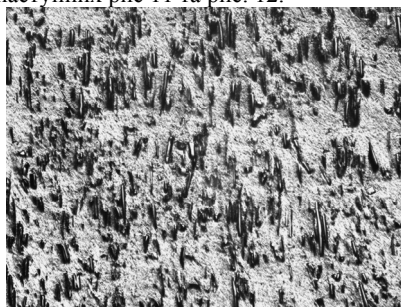


б ділянка I

Рис. 10. Зони утрудненої деформації

В ній спостерігається хаотичне відділення боридної складової. Ця структура характерна для литої структури.

В деформованій зоні боридні включення подрібнюються та орієнтуються в напрямку течії металу, як це наведено на наступних рис 11 та рис. 12.



а – ділянка 6



б – ділянка 7

Рис. 11. Зони течії металу в замковій частині заготовки лопатки

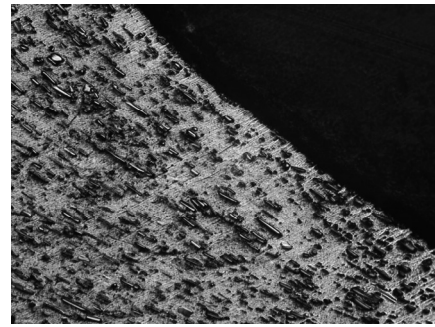
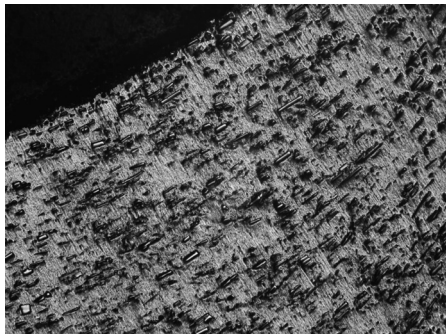


Рис. 12. Течія металу в зоні галтелі на переході від замкової частини до пера лопатки

В замковій зоні спостерігаються сліди хаотичного розташування  $TiB_2$  (див. рис. 11 а). По мірі збільшення величини деформацій в зоні галтелі спостерігається чітка орієнтація боридної складової у напрямку течії металу. Така ж картина спостерігається в зоні пера заготовки лопатки, що показано на рис. 13.

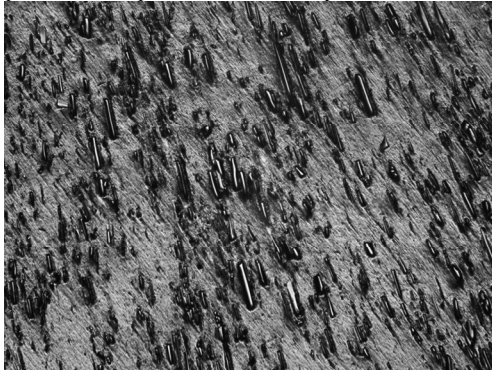


Рис. 13. Структура металу в зоні пера лопатки

Металографічні дослідження показали, що порушення суцільності матеріалу, в тому числі на граничних поверхнях не спостерігається.

#### Висновки

- 1 В ході експерименту було встановлено, що:
  - оптимальну температуру пресування при якій відбувається повне заповнення по довжині пера та радіусних ділянок пера та хвостовика становить  $930^{\circ}C$ ;
  - найбільш ефективним засобом від налипання титану при видавлюванні є використання змащення Графілол В2 з мідним покриттям В3 товщиною  $9...12$  мкм ;
  - оптимальна товщина наплавлення мартенситностаріючого сплаву, який наноситься на робочу частину матриці для підвищення твердості та зносостійкості складає  $1,0...1,5$  мм, це дозволяє після термічної обробки підвищити стійкість інструменту до 10 разів.
- 2 Металографічний аналіз дозволив показати схему розподілу характерних зон розвитку деформацій, які виникають при деформуванні. Технологічні особливості пресування заготовок лопаток з сплаву ВТ-8 були враховані при пресуванні заготовок лопаток з титанового сплаву системи  $Ti-TiB_2$ . Встановлено, що в місцях інтенсивних деформацій титанового сплаву з евтектикою  $TiB_2$ , а саме – в місці течії металу в порожнину матриці, структура матеріалу характеризується наступним:
  - в наслідок великих ступенів деформації боридні включення подрібнюються;
  - розподіл бориду по об'єму сталей, на відміну від вихідної структури;
  - орієнтація бориду змінюється з хаотичної на спрямовану в напрямку течії основного матеріалу.

#### Список літератури

1. Влияние параметров горячего выдавливания заготовок рабочих лопаток компрессора на качество их изготовления /Ю.С. Кресанов, А.Я. Качан В.В. Чигиринский и др. – Вісник двигунобудування, Запоріжжя: ВАТ «Мотор Січ», 2009, №2 –с.108-115.
2. Титов В.А., Лаврінков А.Д., Злочевская Н.К. Деякі особливості пластичного деформування металевих композиційних матеріалів з армуючи ми компонентами довільної форми. Вісник Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут». Серія «Машиностроение». – 2010. №59. с. 135-138 с.
3. Титов В.А., Злочевская Н.К., Алексеенко О.В. Моделирование процессов пластического деформирования композиционных материалов с учетом топологических особенностей структуры Обработка материалов давлением. №2(21). – 2009. С. 106-114.
4. Титов В.А., Злочевская Н.К. Определение эффективных упругих характеристик композитов с несовершенным контактом компонентов. Наукові нотатки Луцького національного технічного університету Міжвузівський збірник (за напрямом «Інженерна механіка») – 2009. № 25, частина II. с. 276-280.