

- Качан А. Я. д-р техн. наук, профессор, зав. кафедрой технологии авиационных двигателей Национального университета «Запорізька політехніка», г. Запорожье, Украина, *e-mail: opt.ugt@motorsich.com*
- Уланов С. А. аспирант кафедры технологии авиационных двигателей Национального университета «Запорізька політехніка», г. Запорожье, Украина, *e-mail: opt.ugt@motorsich.com*

## ВЛИЯНИЕ УСЛОВИЙ ДЕФОРМИРОВАНИЯ ТИТАНОВЫХ СПЛАВОВ НА КАЧЕСТВО ПОВЕРХНОСТИ ПЕРА КОМПРЕССОРНЫХ ЛОПАТОК

**Цель работы.** Повышение качества изготовления заготовок лопаток компрессора из титановых сплавов точной штамповкой.

**Методы и оборудование для исследования.** Исследование проводилось точной штамповкой заготовок лопаток из титанового сплава ВТ8 компрессора авиационного двигателя Д-436 при различной температуре деформации.

Точная штамповка деталей проводилась за один ход инструмента из предварительной заготовки, полученной выдавливанием из прутка диаметром 30 мм.

Исследование поверхности заготовки проводилось после обработки рентгеноспектральным анализом на растровом электронном микроскопе JSM6360LA.

Микротвердость измеряли на приборе ПМТ-3 при нагрузке 50 г.

Исследования точной штамповкой также проводились на лопатках из сплава ОТЧ-1 входного направляющего аппарата КВД вертолетного двигателя Д-136 и на рабочих лопатках компрессора авиационного двигателя Д-36 из титанового сплава ВТ3-1.

**Полученные результаты.** Показано, что условия деформирования заготовки лопатки из титанового сплава точной штамповкой оказывают существенное влияние на качество ее поверхности (макроструктуру и микроструктуру). На макроструктуру и микроструктуру поверхности при точной штамповке лопаток из титановых сплавов влияет температура деформации металла.

**Научная новизна.** Установлено, что при точной штамповке заготовок лопаток из титановых сплавов на качество их поверхности существенное влияние оказывает температура деформации. Определены значения температуры деформации, обеспечивающие значительный уровень качества поверхности пера лопаток при точной штамповке.

**Практическая ценность.** Полученные результаты позволили разработать многопереходную штамповку заготовок лопаток из титановых сплавов, когда применяется дробная деформация за один переход, не превышающая 30 %.

Температура нагрева промежуточной заготовки под деформацию должна быть максимально близкой к  $T_{пл}$  в пределах  $\pm 10$  °С.

**Ключевые слова:** точная штамповка, заготовка лопатки, титановые сплавы, температура деформации, макроструктура, микроструктура, качество, поверхность.

### Введение

В современном авиационном двигателе широкое применение получили титановые сплавы, доля которых достигает более 35 %. Титановые сплавы в основном используются для изготовления компрессоров – дисков, лопаток, направляющих аппаратов, колец и др., что позволяет уменьшить массу авиационных двигателей и увеличить надежность их работы.

Основным методом получения заготовок деталей авиационного двигателя является обработка давлением. Обработка давлением основана на использовании пластичности металлов и сплавов, под которой понимают способность металлов изменять остаточную форму, деформироваться как в холодном, так и горячем состоянии без разрушения под влиянием внешних усилий.

Пластическое деформирование осуществляется различными способами: прокаткой, свободной ков-

кой, объемной штамповкой, прессованием, волочением и листовой штамповкой [1].

### Анализ исследований и публикаций

Сопротивление деформации титановых сплавов резко меняется при изменении температуры деформации, например, понижение температуры деформации сплава ВТ5 с 1000 °С до 950 °С повышает удельные усилия с 170 МН/м<sup>2</sup> до 400 МН/м<sup>2</sup>, т.е. примерно в 2,5 раза [2].

Сопротивление титановых сплавов весьма чувствительно реагирует на изменение скорости деформации. Например, деформация титанового сплава ВТ3-1 при температурах 800 °С, 900 °С, 960 °С и 1020 °С со скоростью деформирования  $2 \cdot 10^{-1}$  с<sup>-1</sup>,  $2 \cdot 10^{-2}$  с<sup>-1</sup>,  $2 \cdot 10^{-3}$  с<sup>-1</sup> и  $2 \cdot 10^{-4}$  с<sup>-1</sup> показала, что сопротивление деформированию при увеличении скорости изменяется от 7 МПа до 45 МПа, а при температуре 800 °С с 30 МПа до 200 МПа. При этом, при деформации при температуре 900 °С со ско-

ростью  $2 \cdot 10^{-3} \text{ с}^{-1}$  напряжение текучести составляет 25 МПа и не зависит от степени деформации. В связи с этим, при ковке титановых сплавов на молоте необходимо применять давление в 4...6 раз выше, чем при статической обработке, и при этом также на 10...20 % снижается пластичность сплава.

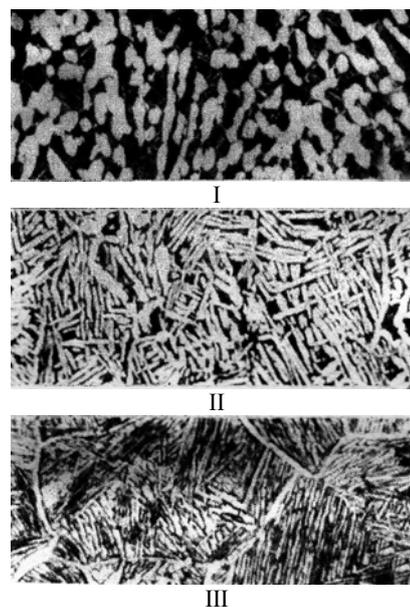
Так же титановые сплавы характеризуются более затрудненным, чем у стали, затеканием металла в глубокие и узкие полости инструмента, которое усугубляется также значительным коэффициентом трения на границе металл-инструмент, низкой теплопроводностью, влекущей более интенсивное охлаждение контактных поверхностей.

Основными факторами, определяющими структуру и свойства поковок из титановых сплавов, особенно на последних переходах штамповки, являются температура и степень деформации. Структура титановых сплавов и связанные с ней свойства поковок формируются в процессе горячей деформации. Структура титановых сплавов в отличие от стали, не претерпевает существенного изменения при термической обработке и не может быть ею исправлена. Поэтому, при разработке технологического процесса штамповки поковок для обеспечения требуемой для работоспособности детали структуры, температура и степень деформации на последнем переходе должна быть не менее 30 % по всему сечению поковки, необходимо уделять особое внимание. Например, равноосная микроструктура (I типа, рис. 1) и микроструктура корзиночного плетения (тип II, рис. 1) имеют неоспоримое преимущество перед игольчатой структурой (тип III, рис. 1) по термической стабильности и пределу выносливости, но уступают игольчатой структуре по характеристикам жаропрочности.

Так для лопаток, испытывающих вибрационные нагрузки необходима двухфазная равноосная  $\alpha+\beta$ - структура (I типа), дающая более высокие значения пластичности, выносливость и наименьшую вибрационную чувствительность к надрезу, но несколько меньшую длительную прочность [2].

В таблице 1 [2] для сплава ВТЗ-1 с различной структурой и режимом термообработки представлены пределы выносливости при комнатной температуре и температуре 450 °С, определенные на прутках диаметрами 14...35 мм, которые подтверждают, что рав-

ноосная структура I типа дает наибольшие значения предела выносливости.



**Рис. 1.** Основные типы микроструктуры двухфазных титановых сплавов, полученной в различных условиях деформации: I тип – равноосная  $\alpha+\beta$ ; II тип – корзиночного плетения; III тип – грубоигольчатая

Для деталей, длительно работающих в условия растягивающих напряжений при повышенных температурах (диски, проставки и др.), необходима структура корзиночного плетения (II тип, рис. 1), которая обеспечивает наиболее высокую жаропрочность и сопротивление ползучести при хорошей пластичности, выносливости и термической стабильности. Такая структура может быть получена при штамповке с нагревом в  $\beta$ - области и последующей деформации со степенью 50...70 % за последний нагрев и окончательной деформации в  $\alpha+\beta$ - области (но не ниже 850 °С).

**Таблица 1 –** Длительная прочность из сплава ВТЗ-1 с различной структурой

Тип микроструктуры, рис. 1	Режим обработки	Предел выносливости, $10^6$ циклов			
		20 °С		450 °С	
		Вид образца		Вид образца	
		гладкий	с надрезом	гладкий	с надрезом
I	1	53	45	46	34
	2	62	48	–	–
II	1	50	36	42	31
	2	59	43	–	–
III	1	45	32	38	26
	2	53	40	–	–

Режим термообработки: 1 – изотермический отжиг, 2 – закалка + старение

В связи с тем, что всякая деформация поковки носит неравномерный характер, то для получения однородной структуры и устранения анизотропии механических свойств поковки из титановых сплавов должны подвергаться значительной деформации. Например, для того чтобы почти в два раза повысить характеристики металла и уменьшить анизотропию свойств, общая деформация литого титанового сплава в интервале температур 800...1000 °С должна быть в пределах 75...80 %. А для достижения высоких механических свойств поволок из уже деформированного металла необходимо, чтобы их деформация была не менее 30 %, а температура деформации не превышала температуры фазового превращения. Оптимальная степень деформации титановых сплавов в  $\alpha+\beta$ - области за один нагрев находится в пределах 30...50 % – при осадке, 25...45 % – при прокатке и выгяжке [3].

Температурный интервал горячей деформации титановых сплавов в большинстве случаев не превышает 150...170 °С. Верхний предел нагрева ограничивается возможностью получения крупнокристаллической структуры и образования существенного альфированного слоя, а нижний – пониженной пластичностью и повышением удельного усилия деформации.

Структура штампуемых поволок из титановых сплавов, как правило, однородна, за исключением прилегающих к контактным поверхностям подстывших от соприкосновения с относительно холодным инструментом слоев. Охлаждение поверхности зависит от времени контакта поковки с инструментом, температуры инструмента и толщины поковки. Например, при штамповке в нагретом до 60...80 °С инструментом поволок, имеющих малую толщину, присущую заготовкам лопаток, толщина подстывшего слоя, проявляющегося крупнокристаллическим ободком, составляет (при штамповке на КГШП) со стороны нижнего штампа 0,4...0,6 мм, а со стороны верхнего – 0,3...0,4 мм. Разница в толщинах крупнокристаллического ободка свидетельствует о меньшем времени соприкосновения поковки с верхним штампом [2]. Такой крупнокристаллический ободок, образовавшийся при штамповке заготовок лопаток из сплава BT3-1, представлен на рис. 2, который свидетельствует о неравномерности деформации, когда средняя часть пера лопатки деформируется сильнее, чем поверхностные слои, подвергаемые меньшему обжатию, попадающему в область критических деформаций.



Рис. 2. Макроструктура заготовки лопатки из сплава BT3-1×1,5

Штамповка титановых сплавов характеризуется большой неоднородностью по температуре и степени деформации, которая вызвана специфическими особенностями деформируемого материала, имеющего в 5...6 раз меньшую, чем у стали, теплопроводность, а

также обладающего высокой чувствительностью к скорости деформации, узким температурным интервалом деформации и высоким коэффициентом трения. Наравне с зонами интенсивного течения металла в поковке присутствуют зоны затрудненной деформации, которые вместе с тепловым эффектом пластической деформации приводят к разнородности материала.

### Цель работы

Повышение качества изготовления лопаток компрессора из титановых сплавов точной штамповкой.

### Результаты исследований и их обсуждение

Исследования, проведенные при точной штамповке рабочих лопаток компрессора двигателя Д-436 из сплава BT8, выявили условия получения неравномерной деформации и появления зон интенсивного течения металла. На рис. 3 представлена макроструктура поверхности пера рабочих лопаток компрессора из сплава BT8, полученных точной штамповкой с наличием тонких блестящих полос как со стороны спинки, так и со стороны корыта. Точная штамповка этих лопаток при различных температурах деформации производилась за один ход инструмента из предварительной заготовки, полученной выдавливанием из прутка диаметром 30 мм. Исследование показало, что при деформации при температуре  $T_m - 55$  °С ( $T_m$  исходного прутка 965 °С) на поверхности пера лопатки после стандартной термообработки при макроанализе обнаружены тонкие блестящие полосы. Аналогично на рис. 4 представлена макро- и микроструктура заготовки лопатки, отштампованной при еще с более низкой температурой ( $T_m - 65$  °С).

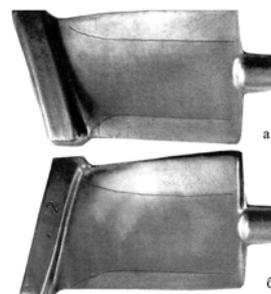


Рис. 3. Макроструктура поверхности пера рабочих лопаток компрессора из сплава BT8

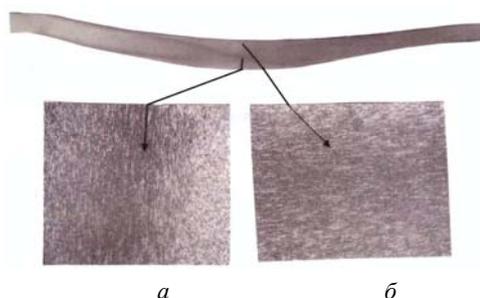


Рис. 4. Макро- (а) и микроструктура (б) в линиях интенсивного течения металла пера лопатки отштампованной при низкой температуре ( $T_m - 65$  °С)

При дослідженні макроструктури в цих зонах спостерігаються ділянки з різним світловим ефектом травимости, зони затрудненої та інтенсивної деформації, «ковочні хрести», прострели. Зони затрудненої деформації зберігають структуру вихідної заготовки. Макроструктура в вигляді темних ліній утворюється, як правило, при високій ступені деформації за один нагрів та температурі – значно нижче температури поліморфного перетворення. Лінії інтенсивного течення металу мають велику локальну деформацію.

Дослідження зон різної травимости рентгено-спектральним аналізом на растровому електронному мікроскопі JSM6360LA показали відсутність якоїсь хімічної неоднорідності металу. А мікротвердість в зонах інтенсивного течення та в основному матеріалі, виміряна на приладі ПМТ-3 при навантаженні 50 г, виявилася однаковою.

Фонове відміння поверхні пера свідчить про характер течення металу по поверхні інструмента та представляє собою зону затрудненої деформації, при якій відбивається відбиток касання попередньої заготовки в формі круга зі штампом. В середній частині пера заготовки лопатки в районі максимальної товщини існує подовжня смуга, яка відрізняється від основної поверхні фоном, що представляє собою лінію інтенсивного течення (ЛІТ) металу (рис. 5а).

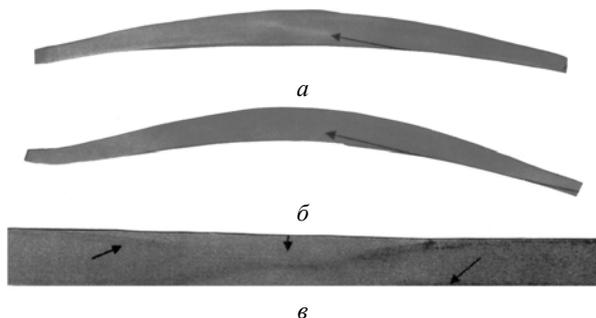


Рис. 5. Мікроструктура поперечного сечення пера лопатки (см. рис. 3) при штамповці з температурою  $T_{mn} - 55\text{ }^\circ\text{C}$  (а) та  $T_{mn} - 30\text{ }^\circ\text{C}$  (б) з ЛІТ

Збільшення температури штамповки до ( $T_{mn} - 30\text{ }^\circ\text{C}$ ) привело до того, що ЛІТ стали менш вираженими та займають меншу область сечення пера (рис. 5б). Мікроструктура в обох випадках була задовільною та відповідавала 1...2 типам при нормі не більше 5 типів (рис. 6).

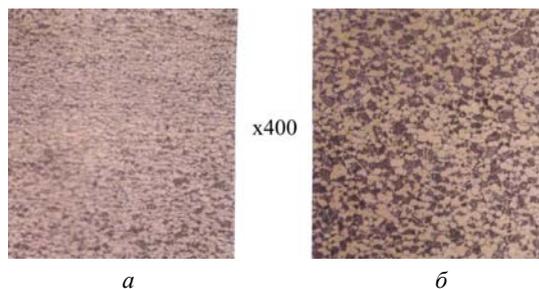


Рис. 6. Мікроструктура лопатки (см. рис. 3) по перу (а) та хвостовику (б)

Аналогічна картина неоднорідної макроструктури по перу точноштампованої лопатки зі сплаву ОТЧ-1 вхідного напрямляючого апарату КВД дв. Д-136 виявлена при штамповці з температурою  $850\text{ }^\circ\text{C}$ . Так же як і в попередніх випадках, при другій геометрії та матеріалі поковки, макроструктура пера цих лопаток виявилася неоднорідною як з боку спинки, так і з боку корита з наявністю в центральній зоні (рис. 7а) смуги з матовим фоном без проявлення макрозерна. В зоні (рис. 7б) з боку вхідної кромки існує витягнуте в осевому напрямленні макрозерно з блискучим фоном, а зона в (вихідній кромці) відрізняється блискучим фоном мікроструктури з рівноосним крупним зерном, що відповідає відповідним 6...7 балам за шкалою ВІАМ. Макроструктура пера зони а та хвостовика (цапфы) лопатки мелкозерниста та відповідає 1 типу структур. Макроструктура лопатки ВНА в поперечному сеченні пера в відповідних зонах з наявністю ЛІТ представлена на рис. 8.



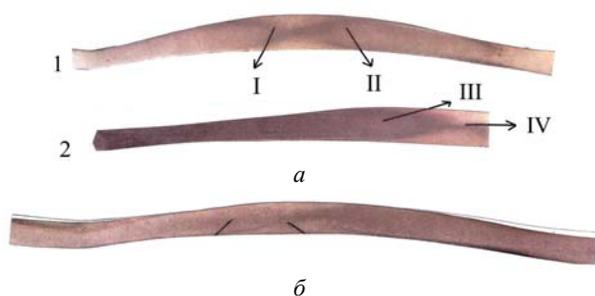
Рис. 7. Макроструктура поверхні пера спрямляючої лопатки зі сплаву ОТЧ-1



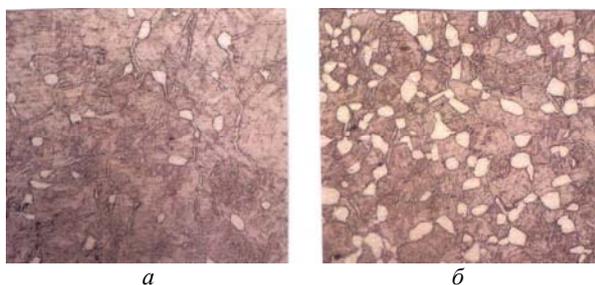
Рис. 8. Мікроструктура в сеченні пера лопатки в зонах а, б, та в (см. рис. 7)

На рис. 9 представлена макроструктура в поперечному сеченні пера заготовки робочої лопатки компресора двигача Д-36 зі сплаву ВТЗ-1 до рекристалізаційного отжига (рис. 9а), яка також свідчить про наявність структурної неоднорідності течення металу в вигляді ЛІТ, а мікроструктура відмінних зон проявленої неоднорідності приведена на рис. 10. Після рекристалізаційного отжига по режиму: нагрів при  $950\text{ }^\circ\text{C}$  в течение 9 год (при  $T_{mn}$  вихідного матеріалу –  $975\text{ }^\circ\text{C}$ ), структура матеріалу кілька змінюється через збиральну рекристалізацію, так як відбулася коагуляція  $\alpha$ - фази, зросло зерно первинної  $\beta$ - фази з помітним зменшенням кількості  $\alpha$ - фази та змінилося внутрізерне будовування (см. рис. 9). Така структура не відповідає вимогам нормативної документації, пред'явлюваної до лопаток компресора. Зона різної травимости, викликана характером деформації відрізняється від основного матеріалу заниженими характеристиками пластичності. Так на поковках зі сплаву ВТЗ-1 подовження зменшується до 6,8 % (при

норме более 10 %), а ударная вязкость до 28 Дж/см<sup>2</sup> (при норме более 30 Дж/см<sup>2</sup>) [3].



**Рис. 9.** Макроструктура сечения пера лопатки из сплава ВТ3-1 в сечении, близком к хвостовику (1), и по длине пера 2 до рекристаллизации (а) и после рекристаллизации (б); I – IV – исследуемые зоны ЛИТ



**Рис. 10.** Микроструктура пера лопатки (см. рис. 9) до рекристаллизации (а) и после (б)

Подобная структура может быть изменена только при достаточной степени деформации [4].

Таким образом, наличие ЛИТ металла при деформации титановых сплавов вызвано несовершенством формы промежуточной заготовки, когда перо лопатки формируется из прутка с низкой (существенно ниже  $T_{mn}$ ) температуры деформации. Так как рекристаллизационный отжиг по стандартным режимам не устраняет структурную неоднородность, то в технологическом процессе точной штамповки необходимо применять оптимальные условия формообразования, когда при многопереходной штамповке используется дробная деформация, которая за один переход должна быть не более 30 %. Температура нагрева промежуточной за-

готовки под деформацию должна быть максимально близкой к  $T_{mn}$  (в пределах  $\pm 10$  °С). Необходимо также вести подогрев штампов до температуры не ниже 300 °С и применение при штамповке смазки инструмента. А так как температура полиморфного превращения поставляемых прутков титановых сплавов может однозначно не соответствовать указанной в сертификате, то перед запуском металла в производство ее обязательно необходимо контролировать по методике, приведенной в инструкции ВИАМ 1054.

## Выводы

1. Температура деформации заготовок лопаток из титановых сплавов при точной штамповке оказывает существенное влияние на качество ее поверхности.

2. Установлено, что многопереходная штамповка заготовки лопаток из титановых сплавов, когда за один переход дробная деформация не превышает 30 %, а температура нагрева промежуточной заготовки максимально близка к  $T_{пл}$ , обеспечивает высокий уровень качества поверхности.

## Список литературы

1. Обработка металлов давлением : учебник в 2-х кн. Кн. 1 : Прокатка, ковка, штамповка / В. А. Богуслаев, В. В. Борисевич, В. К. Борисевич и др. Харьков : Нац. аэрокосмический ун-т «Харьк. авиац. ин-т», 2002. – 419 с.
2. Горячая штамповка и прессование титановых сплавов / Л. А. Никольский, С. З. Фиглин, В. В. Бойцов и др. – М. : Машиностроение, 1975. – 287 с.
3. Глазунов С. Г. Титановые сплавы. Металлография титановых сплавов / Глазунов С. Г., Колачев Б. А. – М. : Metallurgy, 1980. – 464 с.
4. Точная штамповка рабочих лопаток компрессора из сплава ВТ8 / В. И. Омельченко, П. С. Банас, М. С. Кунин и др. // Авиационная промышленность. – 1969. – № 10. – С. 3–6.

Одержано 11.10.2021

## Качан О. Я., Уланов С. О. Вплив умов деформування титанових сплавів на якість поверхні пера компресорних лопаток

**Мета роботи.** Підвищення якості виготовлення заготовок лопаток компресора з титанових сплавів точним штампуванням.

**Методи й обладнання для дослідження.** Дослідження проводилися точним штампуванням заготовок лопаток з титанового сплаву ВТ8 компресора авіаційного двигуна Д-436 при різній температурі деформації.

Точне штампування деталей проводилося за один хід інструмента з попередньої заготовки, яку отримано видавлюванням із прутка діаметром 30 мм.

Дослідження поверхні заготовки проводилось після обробки рентгеноспектральним аналізом на растровому електронному мікроскопі JSM6360LA.

Мікротвердість вимірювали на приладі ПМТ-3 при навантаженні 50 г.

Дослідження точним штампуванням також проводилось на лопатках зі сплаву ОТЧ-1 вхідного напрямного апарата КВТ вертолітного двигуна Д-136 і на робочих лопатках компресора авіаційного двигуна Д-36 з титанового сплаву ВТ3-1.

**Отримані результати.** Показано, що умови деформування заготовок лопатки з титанового сплаву точним штампуванням впливають істотно на якість її поверхні (макроструктуру й мікроструктуру). На макроструктуру й мікроструктуру поверхні при точному штампуванні лопаток з титанових сплавів впливає температура деформації металу.

**Наукова новизна.** Установлено, що при точному штампуванні заготовок лопаток з титанових сплавів на якість їх поверхні істотний вплив має температура деформації. Визначено значення температури деформації, що забезпечують значний рівень якості поверхні пера лопаток при точному штампуванні.

**Практична цінність.** Отримані результати дозволили розробити багатоперехідне штампування заготовель лопаток з титанових сплавів, коли застосовується дробова деформація за один перехід, яка не перевищує 30 %.

Температура нагрівання проміжної заготовки під деформацію повинна бути максимально близької до  $T_{пл}$  у межах  $\pm 10$  °C.

**Ключові слова:** точне штампування, заготовка лопатки, титанові сплави, температура деформації, макроструктура, мікроструктура, якість, поверхня.

#### **Kachan A., Ulanov S. The influence of deformation conditions of titanium alloys on the surface quality of the feather of compressor blades**

**Purpose of work.** Improving the quality of manufacturing of blanks of compressor blades from titanium alloys by precision stamping.

**Research methods and equipment.** The research was carried out by precise stamping of blade blanks from the VT8 titanium alloy of the compressor of the D-436 aircraft engine at various temperatures of deformation.

Precise stamping of parts was carried out in one tool stroke from a preliminary blank obtained by extrusion from a rod with a diameter of 30 mm.

The research of the surface of the workpiece was carried out after processing by X-ray spectral analysis on a JSM6360LA scanning electron microscope.

Microhardness was measured on a PMT-3 device at a load of 50 g.

Investigations by precision stamping were also carried out on blades made of the OTCh-1 alloy of the input guide vane of the HPC of the D-136 helicopter engine and on the rotor blades of the compressor of the D-36 aircraft engine made of VT3-1 titanium alloy.

**The obtained results.** It is shown that the conditions of deformation of a titanium alloy blade blank by precise stamping have a significant effect on the quality of its surface (macrostructure and microstructure). The deformation temperature of the metal affects the macrostructure and microstructure of the surface during precision stamping of blades from titanium alloys.

**Scientific novelty.** It has been established that during precise stamping of blade blanks from titanium alloys, the deformation temperature has a significant effect on the quality of their surface. The values of the deformation temperature are determined, which provide a significant level of quality of the surface of the airfoil of the blades with precise stamping.

**Practical value.** The results obtained made it possible to develop multi-pass stamping of blade blanks from titanium alloys, when fractional deformation in one pass is applied, not exceeding 30%.

The heating temperature of the intermediate billet for deformation should be as close as possible to  $T_m$  within  $\pm 10$  °C.

**Key words:** precision stamping, blade blank, titanium alloys, deformation temperature, macrostructure, microstructure, quality, surface.