

УДК 621.438.002.2

- 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

## ОСОБЕННОСТИ ПРОЦЕССА ГОРЯЧЕГО ВЫДАВЛИВАНИЯ ЗАГОТОВОК РАБОЧИХ ЛОПАТОК КОМПРЕССОРА ГТД

**Цель работы.** Повышение качества изготовления заготовок рабочих лопаток компрессора горячим выдавливанием.

**Методы и оборудование для исследования.** Исследование проводилось с использованием кривошипного прессы с усилием 1000 кН, в разъемных штампах в соответствии с серийным технологическим процессом.

Штампы нагревали до 150...200 °С, для улучшения работы при выдавливании заготовок рабочих лопаток из титанового сплава BT8.

Толщину медного покрытия измеряли магнитоиндукционным прибором ИТМП-3, имеющим погрешность  $\pm 2$  мкм.

Рентгеноспектральный микроанализ проводили на растровом микроскопе ISM-6360ALA.

Нагрев заготовок производили в печи МП-2У.

**Полученные результаты.** Установлено, что на качество заготовок лопаток из титанового сплава BT8, полученных горячим выдавливанием, оказывает влияние состояние медного покрытия, которое предварительно наносят на поверхность исходной заготовки.

При нагревании исходных заготовок медь окисляется и в интервале температур 250...700 °С скорость окисления протекает по линейной закономерности, а после 700...750 °С – по параболической закономерности.

Окисление медного покрытия происходит неравномерно не только в пределах одной заготовки, но и в пределах партии, что приводит к снижению стойкости и ухудшению качества поверхности заготовок лопаток, получаемых горячим выдавливанием.

Исследование, проведенное РСМА медного покрытия выявило наличие оксидов алюминия разной степени дисперсности.

Источником этого материала в медном покрытии является шаржирование в поверхность заготовки ко-ррунда, используемого при обдужке, что является причиной появления задиров на перо заготовки лопатки.

Установлено также, что продольные риски на перо лопатки, являются следствием проявления на рабочей поверхности фильеры матрицы бугорков (напльзов), вызванных адгезией деформируемого материала лопатки к основе металла инструмента.

**Научная новизна.** Установлена закономерность влияния температуры нагрева исходной заготовки лопатки на скорость окисления медного покрытия. Раскрыт механизм влияния окисления медного покрытия и адгезии контактирующих материалов при горячем выдавливании на состояние поверхности получаемых заготовок.

**Практическая ценность.** Полученные результаты позволяют повысить качество изготавливаемых заготовок рабочих лопаток компрессора горячим выдавливанием.

**Ключевые слова:** горячее выдавливание, заготовка рабочей лопатки, титановый сплав BT8, медное покрытие, температура, шероховатость поверхности, риски, окисление.

### Введение

Наиболее прогрессивным методом получения заготовок рабочих лопаток компрессора ГТД является формообразование их пластическим деформированием [1].

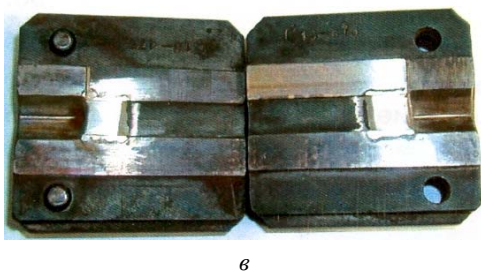
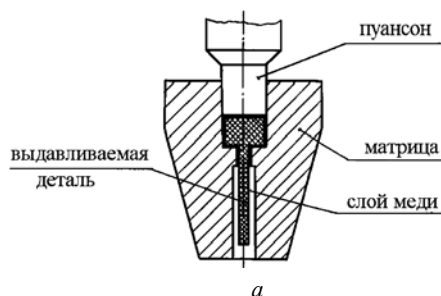
Широкое распространение получил метод (экструдирования) горячего выдавливания заготовок рабочих лопаток, который выполняется по схеме (рис. 1а) на кривошипном одностоечном прессы усилием 1000 кН в разъемных штампах (рис. 1б, в) [2].

Горячим выдавливанием получают заготовки рабочих лопаток компрессора длиной до 50 мм, имею-

щие развитый массивный хвостовик, приближающийся в осевой проекции к квадрату, и относительно тонкое перо. Заготовки лопаток из нержавеющей стали 1X16H2AM (ЭП479) и титанового сплава BT8 изготавливаются с припуском 0,1...0,2 мм на сторону, по сечению пера лопатки.

Заготовки рабочих лопаток, полученные методом горячего выдавливания, затем формуют методом холодного вальцевания, который предъявляет высокие требования к качеству получения заготовок, так как при этом не происходит удаление металла по поверхности пера за исключением входных и выход-

ных кромок и перехода хвостовика в перо. Поэтому одним из важных и актуальных направлений исследования горячего выдавливания заготовки рабочих лопаток, является изучение влияния параметров процесса на качество их изготовления.



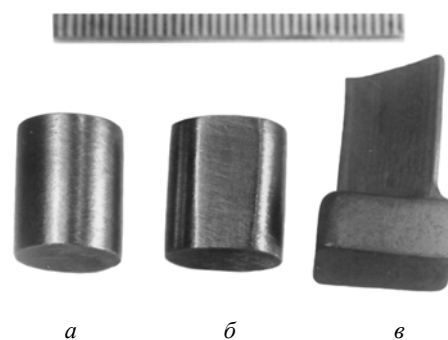
**Рис. 1.** Метод и оборудование для горячего выдавливания заготовок рабочих лопаток:

а – схема экструдирования заготовки лопатки;  
б – пресс и оснастка для горячего выдавливания заготовок;  
в – разъемная матрица для выдавливания заготовок

### 1 Анализ исследований и публикаций

Особенностью процесса горячего выдавливания заготовок лопаток является применение металлической смазки предварительной (исходной) заготовки, которую перед нагревом под деформацию покрывают гальваническим способом медью толщиной 12...18 мкм с подслоем никеля толщиной 1 мкм. Заготовки перед покрытием должны быть обдuty абразивом и иметь чистую без следов масла, абразивного порошка и пыли поверхность, на которой отсутствует окисленный слой, заусенцы, трещины. На заготовках, прошедших осадку с нагревом цилиндрической исходной заготовки вдоль оси (рис. 2б), необходимо гарантиро-

ванно удалять окисленный (для титановых сплавов альфированный) слой. При этом микротвердость поверхности промежуточных заготовок из титанового сплава ВТ8 не должна превышать 500 НV при микротвердости сердцевины в пределах 320 НV. Для лучших условий проведения процесса выдавливания необходимо, чтобы величина микротвердости поверхности не превышала микротвердость основы более, чем на 20 %. Шероховатость поверхности заготовки перед покрытием должна быть не хуже 1,25 мкм. А так как прутки, например, из сплава ВТ8, поступают с шероховатостью 20...40 мкм, то их необходимо шлифовать, доводя шероховатость поверхности до требуемой величины.



**Рис. 2.** Технологические переходы при горячем выдавливании заготовки рабочей лопатки компрессора:

а, б – исходная и предварительная заготовка;  
в – лопатка

При проведении исследований процесса горячего выдавливания заготовок рабочих лопаток из титанового сплава ВТ8 определялось влияние на качество изготовления температуры деформации, толщины медного покрытия, исходной заготовки и ее формы перед выдавливанием, смазки, скорости деформирования, упрочняющих покрытий штампа и шероховатости поверхности.

#### *Влияние температуры деформации*

Установлено, что повышение температуры нагрева заготовки перед выдавливанием приводит к резкому ухудшению их качества. Показано, что при покрытии исходных заготовок из сплава ВТ8 медью толщиной 9...18 мкм рабочей температурой горячего выдавливания является температура 830...870 °С [2].

#### *Влияние толщины медного покрытия*

Установлено, что толщина медного покрытия в пределах 4...6 мкм приводит к образованию рисок уже на 5-й заготовке, толщина 9...12 мкм медного покрытия – к образованию рисок на 40...50-й заготовках, а толщина медного покрытия 20...25 мкм – к образованию рисок на 80...90-й заготовках [2, 4].

*Конструктивные особенности матрицы и геометрия торца исходной заготовки* влияют на образование повышенной шероховатости пера при выдавливании заготовок лопаток но и на образование закована лопатках компрессора, из титанового сплава ВТ8.

Установлено, что применение круглой заготовки

с радиусом между торцем и цилиндрической поверхностью  $R4^{+2}$  (мм) уменьшает шероховатость и устраняет заковы, что повышает стойкость штампов на 10 % [2, 4].

*Влияние скорости деформирования*

Уменьшение скорости деформирования приводит к улучшению состояния поверхности и не вызывает отклонения геометрии выдавленных заготовок лопаток. [2, 4]

*Влияние вида смазки на процесс выдавливания*

Установлено, что наиболее эффективной является смазка: графит (30 %) и машинное масло (70 %) [2, 4].

*Влияние деформационной неоднородности на пластическое течение металла пера выдавливанием заготовки рабочих лопаток компрессора*

Выдавливание заготовок лопаток с развитым хвостовиком и тонким пером сопровождается следующими особенностями:

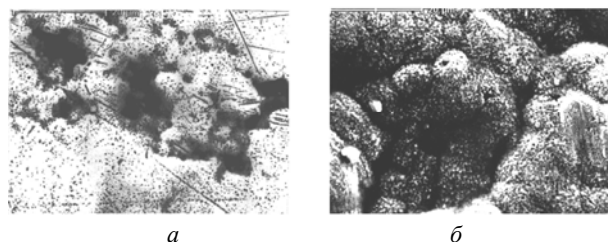
- деформационная неоднородность пластического течения металла в тонкостенной перьевой части значительно больше неоднородности течения металла в хвостовой части;
- продольное течение металла в области перьевой части профиля является неустановившимся процессом;
- в области пера лопатки деформированное состояние отличается значительной неравномерностью как в продольном, так и в поперечном направлениях;
- деформации металла в хвостовой и перьевой части связаны между собой и оказывают друг на друга взаимное воздействие [3.]

**2 Цель работы**

Повышение качества изготовления заготовок рабочих лопаток компрессора горячим выдавливанием.

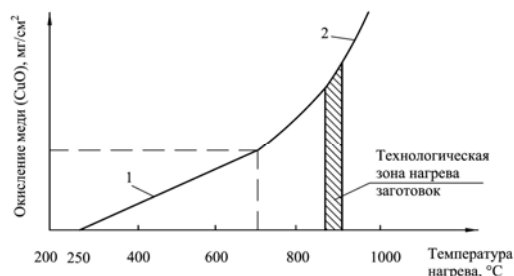
**3 Результаты исследований и их обсуждение**

Для улучшения сцепления меди заготовки предварительно проходят никельхлористую обработку в электролите, имеющем следующий состав: 200...240 г/л хлористого никеля и 70...100 г/л соляной кислоты с удельной массой 1,19. Гальваническое меднение заготовок целесообразно проводить в колокольных ваннах. Так меднение заготовок, проведенное в неподвижной корзине (режим обработки: количество погруженных заготовок – 800...1000 штук, время обработки – 60...90 мин, сила тока – 20...40 А) и в колокольной ванне показало существенное отличие состояния их поверхностей. Заготовки, покрытые медью в корзине, имели грубую «зернистую» поверхность, а в колокольной ванне – блестящую поверхность с меньшей шероховатостью и более мелкой структурой, обусловленную эффектом их полирования при вращении колокола (рис. 3). Такая поверхность при последующем нагреве менее склонна к неравномерному окислению медного покрытия.



**Рис. 3.** Микрорельеф поверхности медного покрытия на заготовке, полученной в колокольной ванне (а) и в корзине (б)

Толщину медного покрытия измеряли в центре торца исходной заготовки магнитоиндукционным прибором ИТМП-3, имеющим погрешность  $\pm 2$  мкм. В особых случаях контроль толщины медного покрытия можно выполнять капельным химическим способом по ГОСТ 9.302-88, после которого заготовка требует повторного покрытия. Качество сцепления медного покрытия с основным металлом проверялось методом крацевания металлической щеткой с диаметром проволоки 0,2 мм при частоте вращения 2000 об/мин в течение не менее 15 с. На поверхности медненных заготовок не допускается непокрытых участков поверхности. В связи с наличием медного покрытия исходные заготовки перед выдавливанием нагревают при меньшей температуре, чем обычно рекомендовано для обрабатываемого металла, например, для сплава ВТ8 она составляет 870 °С. Такое понижение температуры нагрева перед деформацией вызвано окислением медного покрытия, которое при высокой температуре нагрева и длительной выдержке при этой температуре может полностью окислиться, обнажив основной материал. Окисление медного покрытия носит неравномерный характер не только в пределах одной заготовки, обусловленное некоторыми технологическими условиями его нанесения, но и существенно зависит от температуры. Скорость окисления меди в интервале температур 250...700 °С протекает по линейной закономерности (кривая 1), а после 700...750 °С резко возрастает по параболической кривой (кривая 2, рис. 4).



**Рис. 4.** Скорость окисления меди от температуры нагрева

При повышенных температурах (более 700 °С) медь активно взаимодействует с кислородом с образованием пленки закиси меди ( $Cu_2O$ ), которая обладает, однако, большей пластичностью, чем окись меди ( $CuO$ ) [4]. Оптимальную температуру нагрева меднен-

ных заготовок толщиной 9...12 мкм при выдавливании исследовали на рабочих лопатках XII ступени компрессора двигателя ТВ3-117. Исходные (промежуточные) заготовки нагревали в интервале температур 890...950 °С, который на 20...80 °С выше принятого в производственном технологическом процессе. Проведенные исследования свидетельствуют о том, что повышение температуры нагрева исходной заготовки под выдавливание ухудшает качество полученных заготовок лопаток по всем оценочным критериям (качество поверхности, заковы по хвостовику, незаполнение радиусных поверхностей хвостовика). Малое количество исследованных при температуре 930 °С заготовок объясняется крайне неудовлетворительным состоянием заготовок лопаток. В связи с этим обстоятельством, выдавливание заготовок лопаток при температуре нагрева 950 °С в дальнейшем не производилось.

Проведенное РСМА медного покрытия на заготовках, показавших неудовлетворительную стойкость оснастки, выявило наличие окислов алюминия разной степени дисперсности, источником присутствия которых является шаржирование в поверхность заготовки корунда, используемого при обдувке. Этот высокотвердый материал может явиться причиной появления задиrow на пере заготовки лопатки при выдавливании. На рис. 5, 6 представлены результаты исследования этих включений.

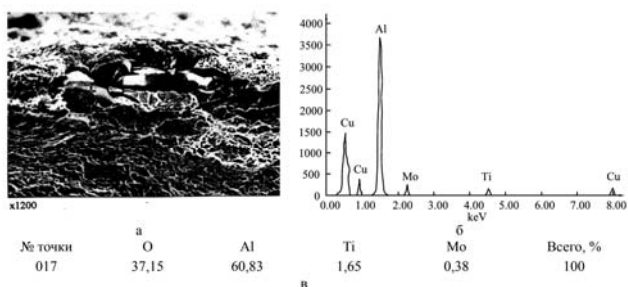


Рис. 5. РСМА химического состава включения под слоем меди на исходной заготовке:

*а* – структура включения и место анализа; *б* – спектрограмма от анализируемого места; *в* – примерный химический состав

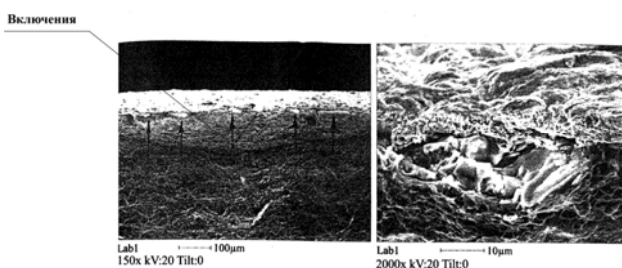
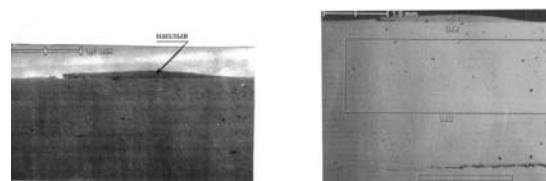


Рис. 6. Включения корунда на поверхности исходной заготовки рабочей лопатки компрессора под слоем меди (до нагрева под выдавливание)

Так как управление скоростями и толщинами образования фазовых слоев при экстремальных условиях нагрева медненных заготовок не представляется возможным, то для уменьшения скорости протекания диффузионных процессов необходимо строго соблюдать толщину медного покрытия, температуру и время нагрева перед выдавливанием. Время нагрева исходных заготовок можно сократить за счет уменьшения загрузки заготовок в печь до 15...20 шт. Так уменьшение времени нагрева до 7 мин при температуре 870 °С заготовки, имевшей толщину медного покрытия 9...18 мкм, при выдавливании поковки лопатки V ступени компрессора двигателя ТВ3-117 из сплава ВТ8 показало хорошую шероховатость поверхности пера без рисок и задиrow и высокую стойкость матрицы. Уменьшение количества нагреваемых в печи МП-2У заготовок также актуально и для стабилизации их температуры нагрева. Нагрев заготовок диаметром 12 мм и высотой 20 мм из сплава ВТ8 с зачеканенной термопарой производился на расстоянии 170 мм от дверцы печи которая имела окно выдачи размером 100 мм × 60 мм. Проведенные измерения температуры контрольной заготовки, находящейся в печи в течение 6 мин, что соответствует выработке 50-ти нагреваемых заготовок, показали падение ее температуры примерно на 80 °С (с 881 °С до 807 °С). Продольные риски на пере лопатки являются следствием появления на рабочей поверхности фильеры матрицы бугорков («напылов»), вызванных адгезией деформируемого материала лопатки к основе металла инструмента. Элементный состав материала «напыла», определенный методом РСМА на растровом электронном микроскопе JSM-6360LA, показал, что он действительно состоит из сплава ВТ8 с наличием в его поверхностной зоне меди, достигающей до 54 %. Наличие такого количества меди на титановой основе «напыла» объясняется тем, что вначале произошло схватывание (адгезия) титана с матрицей с образованием на матрице выступа, на который впоследствии происходило «намазывание» медного покрытия при дальнейшей деформации (рис. 7).



№ точки	а					б				
	Al	Si	Ti	V	Cr	Fe	Co	Mo	W	
012	0,02	0,55	89,70					3,73		
013		2,50			23,11	25,67	44,24		4,47	
015		0,69		0,31	3,96	91,63		1,94	1,47	

Рис. 7. Внешний вид «напыла» на поверхности стеллита (*а*) и РСМА образца из штампа (сталь ДИ22МП), наплавленного по рабочей части стеллитом ВЗК в зоне образования напыла (*б*) и элементный состав анализируемых участков (*в*) 012 – «напыл», 013 – наплавка, 015 – материал штампа

### Выводы

1. Толщина и качественное нанесение медного покрытия на исходную заготовку является одним из важнейших факторов проведения процесса горячего выдавливания заготовок лопаток из титанового сплава BT8.

2. Установлено, что при некачественном медном покрытии до 50 % выдавленных заготовок лопаток имеют на поверхности риски.

### Список литературы

1. Технология производства авиационных двигателей. Ч. I / В. А. Богуслаев, А. Я. Качан, В. Ф. Мозговой, Е. Я. Корневский. – Запорожье : АО «Мотор Сич», 2000. – 944 с.

2. Технологическое обеспечение эксплуатационных характеристик деталей ГТД: монография. Ч. I

Лопатки компрессора и вентилятора / В. А. Богуслаев, П. Д. Жеманюк, А. Я. Качан и др. – 2-е изд., перераб. и доп. – Запорожье : АО «Мотор Сич», 2017. – 500 с.

3. Чигиринский В. В. Исследование течения металла при выдавливании заготовок компрессорных лопаток / Чигиринский В. В., Бень А. Н., Кресанов Ю.С. // Обработка металлов давлением : сб. науч. трудов Донбасской государственной машиностроительной академии (ДГМА). – Краматорск : ДГМА, 2013. – № 1 (34). – С. 100–105.

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

Одержано 30.06.2021

### Качан О. Я., Уланов С. О. Особливості процесу гарячого видавлювання заготовок робочих лопаток компресора ГТД

**Мета роботи.** Підвищення якості виготовлення заготовок робочих лопаток компресора гарячим видавлюванням.

**Методи й обладнання для дослідження.** Дослідження проводилися з використанням кривошипного преса із зусиллям 1000 кН, у роз'ємних штампах відповідно до серійного технологічного процесу.

Штампи нагрівали до 150...200 °С, для поліпшення роботи при видавлюванні заготовок робочих лопаток з титанового сплаву BT8.

Товщину мідного покриття вимірювали магнітоіндукційним приладом ИТМП-3, що має погрешність  $\pm 2$  мкм.

Рентгеноспектральний мікроаналіз проводили на растровому мікроскопі ISM-6360ALA.

Нагрівання заготовок робили в печі МП-2В.

**Отримані результати.** Установлено, що на якість заготовок лопаток з титанового сплаву BT8, отриманих гарячим видавлюванням, впливає стан мідного покриття, що попередньо наносять на поверхню вихідної заготовки.

При нагріванні вихідних заготовок мідь окислюється й в інтервалі температур 250...700 °С швидкість окислювання протікає по лінійній закономірності, а після 700...750 °С – по параболічній закономірності.

Окислювання мідного покриття відбувається нерівномірно не тільки в межах однієї заготовки, але й у межах партії, що приводить до зниження стійкості й погіршенню якості поверхні заготовок лопаток, одержаних гарячим видавлюванням.

Дослідження, проведене РСМА мідного покриття виявило наявність оксидів алюмінію різного ступеня дисперсності.

Джерелом цього матеріалу в мідному покритті є шаржування в поверхню заготовки корунду, використаного при обдуванні, що є причиною появи задирів на пері заготовки лопатки.

Установлено також, що поздовжні риски на пері лопатки, є наслідком прояву на робочій поверхні фільтри матриці бугорків (напливів), викликаних адгезією деформованого матеріалу лопатки до основи металу інструмента.

**Наукова новизна.** Встановлено закономірність впливу температури нагрівання вихідної заготовки лопатки на швидкість окислювання мідного покриття. Розкрито механізм впливу окислювання мідного покриття й адгезії контактуючих матеріалів при гарячому видавлюванні на стан поверхні одержуваних заготовок.

**Практична цінність.** Отримані результати дозволяють підвищити якість заготовок робочих лопаток компресора виготовлених гарячим видавлюванням.

**Ключові слова:** гаряче видавлювання, заготовка робочої лопатки, титановий сплав BT8, мідне покриття, температура, шорсткість поверхні, риски, окислювання.

### Kachan A., Ulanov S. Features of the process of hot extrusion of blanks of the rotor blades of a GTE compressor

**Purpose.** Improving the quality of manufacturing of blanks for compressor rotor blades by hot extrusion.

**Research methods and equipment.** The research was carried out using a crank press with a force of 1000 kN, in split dies in accordance with a serial technological process.

The dies were heated up to 150 ... 200 °C, to improve the work when extruding the blanks of the rotor blades made from the titanium alloy BT8.

The thickness of the copper coating was measured with an IITMII-3 magnetic induction device with an error of  $\pm 2 \mu\text{m}$ .

X-ray spectral microanalysis was performed on an ISM-6360ALA scanning microscope.

The billets were heated in an MII-2B furnace.

**Results.** It has been established that the quality of blade blanks made of BT8 titanium alloy obtained by hot extrusion is influenced by the state of the copper coating, which is preliminarily applied to the surface of the original blank.

When the initial blanks are heated, copper is oxidized and in the temperature range of 250...700 °C the oxidation rate proceeds according to a linear pattern, and after 700...750 °C – according to a parabolic pattern.

Oxidation of the copper coating occurs unevenly not only within one workpiece, but also within the batch, which leads to a decrease in durability and deterioration of the surface quality of the blade workpieces obtained by hot extrusion.

Research carried out by X-ray spectral microanalysis of the copper coating revealed the presence of aluminum oxides of varying degrees of dispersion.

The source of this material in the copper coating is caricature of corundum used in blowing into the surface of the billet, which is the reason for the appearance of scoring on the blade blank.

It was also found that longitudinal marks on the blade are a consequence of the appearance of a matrix of tubercles (sagging) on the working surface of the die, caused by the adhesion of the deformable material of the blade to the base metal of the tool.

**Scientific novelty.** The regularity of the influence of the heating temperature of the initial blank of the blade on the oxidation rate of the copper coating has been established. The mechanism of the influence of the oxidation of the copper coating and the adhesion of contacting materials during hot extrusion on the surface condition of the resulting blanks is disclosed.

**Practical value.** The results obtained make it possible to improve the quality of the manufactured blanks of the compressor rotor blades by hot extrusion.

**Key words:** hot extrusion, working blade blank, BT8 titanium alloy, copper coating, temperature, surface roughness, oxidation.