

ПОВЫШЕНИЕ НЕСУЩЕЙ СПОСОБНОСТИ ЛОПАТОК КОМПРЕССОРА

Богуслаев В.А., Лукьяненко О.Л., Пухальская Г.В.

(ОАО «Мотор Сич», ОАО «Мотор Сич», ЗНТУ, г. Запорожье, Украина)

Presented are the researches on durability and impact strength of compressor blades made from VT8M alloy after complex treatment (plasma coating with titanium nitride and ultrasonic shot blasting hardening).

Лопатки компрессора газотурбинного двигателя в процессе эксплуатации работают в условиях воздействия высокочастотных знакопеременных нагрузок, центробежных сил и соударения с инородными телами. Основным видом отказов лопаток в эксплуатации являются усталостные разрушения, которые инициируются эрозионными повреждениями и, в отдельных случаях, разрушениями кромок пера при соударении с инородными телами, которые попадают в тракт двигателя.

Эрозия наиболее характерна для рабочих лопаток компрессоров, работающих на запыленном или влажном воздухе. Она происходит от ударов о лопатку капелек воды или частиц пыли, содержащихся в воздухе.

Поэтому повышение несущей способности (параметров выносливости и износостойкости) лопаток компрессора является актуальной задачей, решаемой комплексной обработкой на финишных операциях технологического процесса.

Решение такой задачи базируется на управлении формированием характеристик поверхностного слоя и параметров выносливости после нанесения ионно-плазменного износостойкого покрытия с применением отделочно-упрочняющих методов обработки.

Одной из наиболее нагруженных деталей компрессора вертолетного двигателя ТВЗ-117 является лопатка I-ой ступ. из сплава VT8M, которая наиболее часто подвергается повреждениям в процессе эксплуатации. Сплав VT8M имеет высокие прочностные характеристики, способен сохранять их при длительной эксплуатации, но, как и все титановые сплавы, чувствителен к наличию технологических микродефектов и эксплуатационных повреждений.

Известные публикации по отдельному применению эрозионностойких покрытий и отделочно-упрочняющей обработки не дают полного ответа на вопрос о влиянии комплексной обработки на сопротивление усталостному разрушению лопаток компрессора из титановых сплавов.

Применение тонкопленочных эрозионностойких покрытий, полученных на основе вакуум-плазменных технологий, получает все большее распространение, особенно для лопаток компрессора и др. деталей, работающих при знакопеременных нагрузках.

Выход из строя детали с покрытием в процессе эксплуатации может происходить в результате отслаивания покрытия от основы (нарушение адгезионной прочности) или разрушения самого покрытия (когезионное растрескивание), а также под действием остаточных напряжений еще до начала эксплуатации [1, 2]. В работе [1] показано, что увеличение остаточных напряжений на контактной поверхности приводит к снижению адгезионной прочности.

При ионно-плазменных методах нанесения покрытий значительный вклад в величину и знак остаточных напряжений вносит термическая компонента. Исследования, проведенные в TiN – пленках, нанесенных на стальные образцы [3] показали, что при комнатной температуре величина сжимающих напряжений составляла 4 ГПа.

Отделочно-упрочняющие методы, позволяющие формировать в приповерхностном слое заданные характеристики, в значительной мере определяют несущую способ-

ность лопаток компрессора. Большое значение имеет соотношение деформированного слоя и внутреннего объема металла, поскольку это связано с формированием остаточного напряженного состояния.

Сложность прогнозирования прочности материалов при циклическом нагружении связана с тем, что процесс зарождения и распространения усталостной трещины является локальным. А на сопротивление усталостному разрушению влияют многие факторы: высокие локальные напряжения в объемах металла, соизмеримых с размерами его структурных составляющих, обусловленные уровнем внешних нагрузок, цикличность нагружения, состояние поверхностного слоя, концентрация напряжений, масштабный фактор и другие [4].

Целью работы являлось исследование влияния комплексной обработки (ультразвуковое упрочнение шариками + нитридтитановое покрытие, нанесенное методом КИБ) пера лопаток компрессора на формирование характеристик поверхностного слоя и сопротивление усталости.

Объектом исследования служили лопатки I-ой ступени компрессора двиг. ТВЗ-117 у которых входная кромка и корыто в большей мере подвержены интенсивному эрозионному воздействию воздушного потока, содержащего твердые и жидкие частицы.

Величина шероховатостей и характер микрорельефа являются одной из основных характеристик поверхностного слоя, оказывающих значительное влияние на уровень технологической концентрации напряжений на пера лопаток компрессора (спинка, корыто, входная и выходная кромки). Отдельные риски, особенно поперечные риски на тонких кромках лопаток, могут явиться местом зарождения усталостных трещин.

Профиллограммы и параметры шероховатости поверхности, определенные с помощью пертометра «Pertometer M3» и представленные на рис. 1 и в табл. 1 показали, что наиболее благоприятный микрорельеф и низкие значения параметра Ra были получены на лопатках, подвергнутых ультразвуковому упрочнению с последующим напылением TiN. Значение Ra снизилось с 0,37 до 0,22...0,28 мкм.

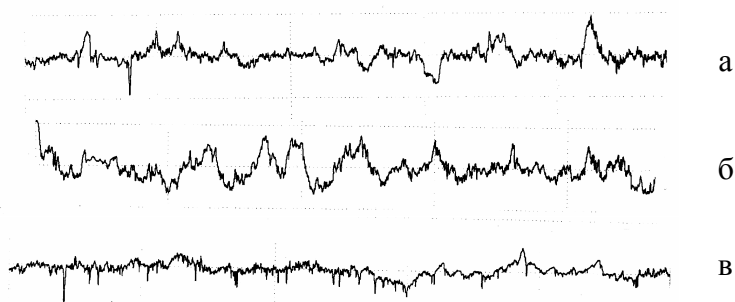


Рис. 1. Профиллограммы поверхностей пера лопаток после: а – ВП; б – ВП+КИБ; в – ВП+УЗУ (5 мин) +КИБ

Таблица 1. Параметры шероховатости пера лопаток

Наименование параметра, мкм	ВП	ВП+КИБ	ВП + УЗУ(5 мин)+КИБ
Ra	0,37	0,34	0,27

Микротвердость поверхности пера лопаток, обработанных различными методами, определяли на образцах, вырезанных из кромок и срединной части спинки (рис. 2). Микротвердость сердцевины определяли на шлифах. Результаты исследований представлены в табл. 2 и показаны на рис. 3, 4, 5.

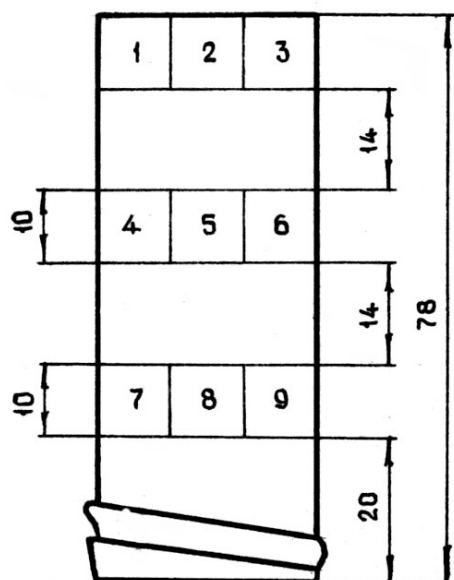


Рис. 2. Схема вырезки образцов из лопатки

Таблица 2. Результаты исследований микротвердости поверхности лопаток

Метод обработки пера лопаток	Номер участка	$H_{\mu}^{нов}$, МПа	$H_{\mu}^{сер.}$, МПа	Степень наклепа H , %	\bar{H} , %
Виброполирование	7к	4110	3800	8	9
	4к	4395		16	
	1к	3950		4	
	8с	4090		8	
	5с	4230		11	
	2с	4120		8	
	9к	3950		4	
	6к	4260		12	
	3к	4130		9	
Виброполирование + КИБ	7к	7700	3850	100	101
	4к	7680		99	
	1к	7710		100	
	8с	7950		106	
	5с	7900		105	
	2с	7710		100	
	9к	7300		90	
	6к	7750		101	
	3к	7920		106	
Виброполирование + УЗУ(5 мин) + КИБ	7к	7750	3880	100	109
	4к	8050		107	
	1к	8350		115	
	8с	8040		107	
	5с	8400		116	
	2с	7850		102	
	9к	8250		113	
	6к	7810		101	
	3к	8210		119	

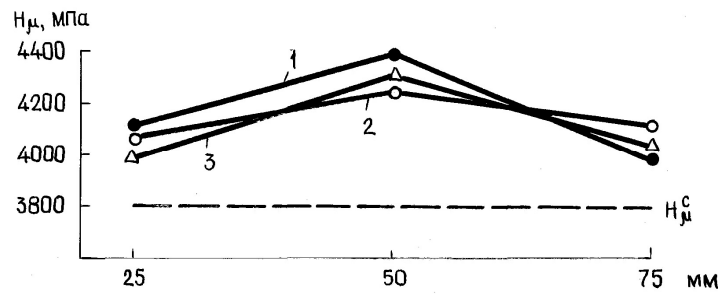


Рис. 3. Изменение микротвердости поверхности по длине лопатки после ВП:
1 – вых. кромка; 2 – спинка; 3 – вх. кромка

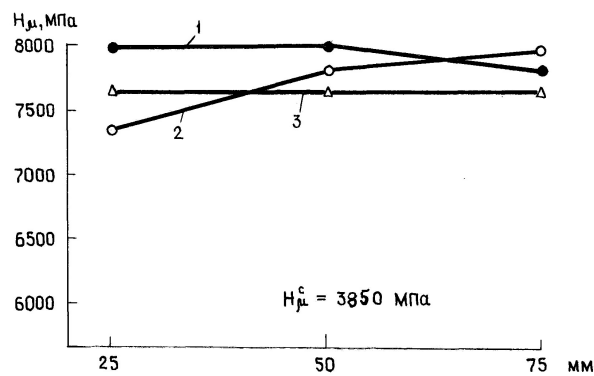


Рис. 4. Изменение микротвердости поверхности по длине лопатки после ВП + КИБ: 1 – спинка; 2 – вх. кромка; 3 – вых. кромка

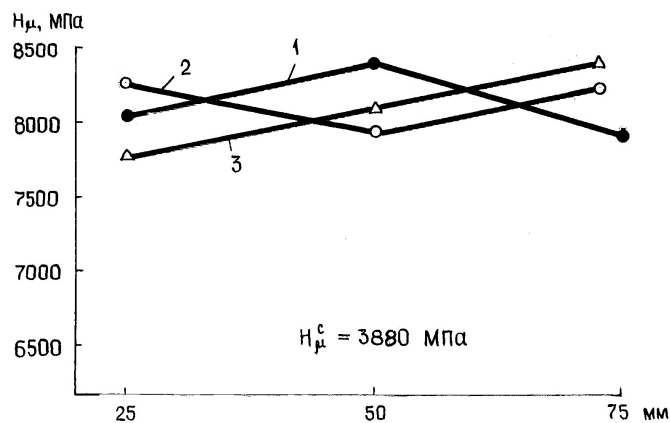


Рис. 5. Изменение микротвердости поверхности по длине лопатки после ВП+УЗУ (5 мин) + КИБ: 1 – спинка; 2 – вх. кромка; 3 – вых. кромка

Исследования микротвердости показали, что комплексная обработка приводит к повышению степени наклепа с 9% до 101...109%. Характерно, что по длине лопатки микротвердость меняется незначительно, в пределах рассеяния.

Для оценки влияния комплексной обработки на напряженное состояние лопаток определяли остаточные напряжения по кривизне напыленного прямоугольного образца [4]. При нанесении покрытия на образец небольшой толщины с одной стороны происходит его деформация. С использованием уравнения упругой линии для балки в работе [5] получена зависимость для расчета остаточных напряжений:

$$\sigma_{ост} = \frac{4EH^2}{3a^2(1-\mu)} \frac{f}{h},$$

где $E = 1,20 \cdot 10^5$ МПа – модуль Юнга титанового сплава ВТ8М;

$H = 3$ мм – толщина образца;

$a = 80$ мм – длина образца;

$\mu = 0,3$ коэффициент Пуассона.

Образцы подвергали ультразвуковому упрочнению и напылению TiN в закрепленном состоянии с одной стороны. После комплексной обработки в свободном состоянии образец деформировался из-за перераспределения остаточных напряжений в направлении упрочненной поверхности. Это подтверждало, что в процессе комплексной обработки были наведены сжимающие остаточные напряжения. Величина прогиба была измерена на контрольном столе с помощью устройства с индикаторными часами (цена деления – 1 мкм).

Результаты измеренных деформаций образцов и рассчитанных величин остаточных напряжений представлены в табл. 3.

Таблица 3. Результаты исследований остаточных напряжений

Вид обработки	Длина образца a , мм	Стрела прогиба f , мм	$\sigma_{ост}$, МПа
ВП+КИБ	79,8	-0,004	-650
ВП+УЗУ(5мин)+КИБ	80,1	-0,0105	-810

Как видно из табл. 3 уровень остаточных напряжений после комплексной обработки оказался несколько выше, чем уровень напряжений после ВП+КИБ.

Определение прочности сцепления (адгезионной прочности) покрытия с исследуемым материалом производили на плоских образцах размером $3 \times 8 \times 80$. Образцы изготавливали по технологии, по которой серийно напыляются лопатки TiN.

Испытания образцов с нитридтитановыми покрытиями на адгезионную прочность проводили с помощью ступенчатого вала, установленного в патроне токарного станка (рис. 6). Диаметры ступенек вала изменялись от 150 до 43 мм. Исследуемый образец прижимали нижним концом к поверхности ступеньки вала с наибольшим диаметром и производили изгиб (обжатие) с помощью оправки.

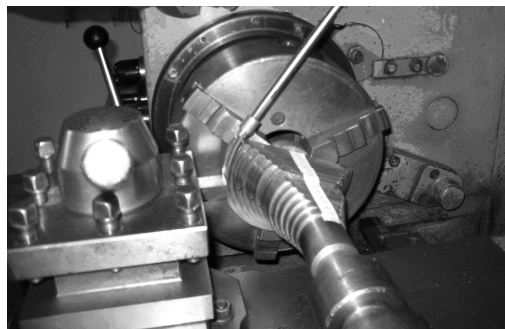


Рис. 6. Ступенчатый вал в патроне станка с изогнутым образцом

Затем на микроскопе МБС-9 (увеличение $\times 16,7$) определяли появление микротрещин в покрытии. При отсутствии микротрещин производили изгиб на следующей ступеньке вала с меньшим диаметром. При появлении микротрещин на поверхности образца с нитридтитановым покрытием испытания прекращали и рассчитывали уровень сжимающих напряжений, по которым оценивали адгезионную прочность.

Исследованиям подвергали образцы окончательно обработанные ВП+КИБ, УЗУ+КИБ и ультразвуковым упрочнением с последующим гляцеванием (тонким полированием)+КИБ. Гляцевание целесообразно применять для тонких кромок лопаток при устранении заусенцев, образованных в процессе ультразвукового упрочнения шариками. Предшествующую напылению TiN ультразвуковую обработку выполняли по серийной технологии упрочнения лопаток III-й ступ. КНД дв. Д-36 в течение 5 мин.

Образцы с покрытием до и после испытаний представлены на рис. 7.

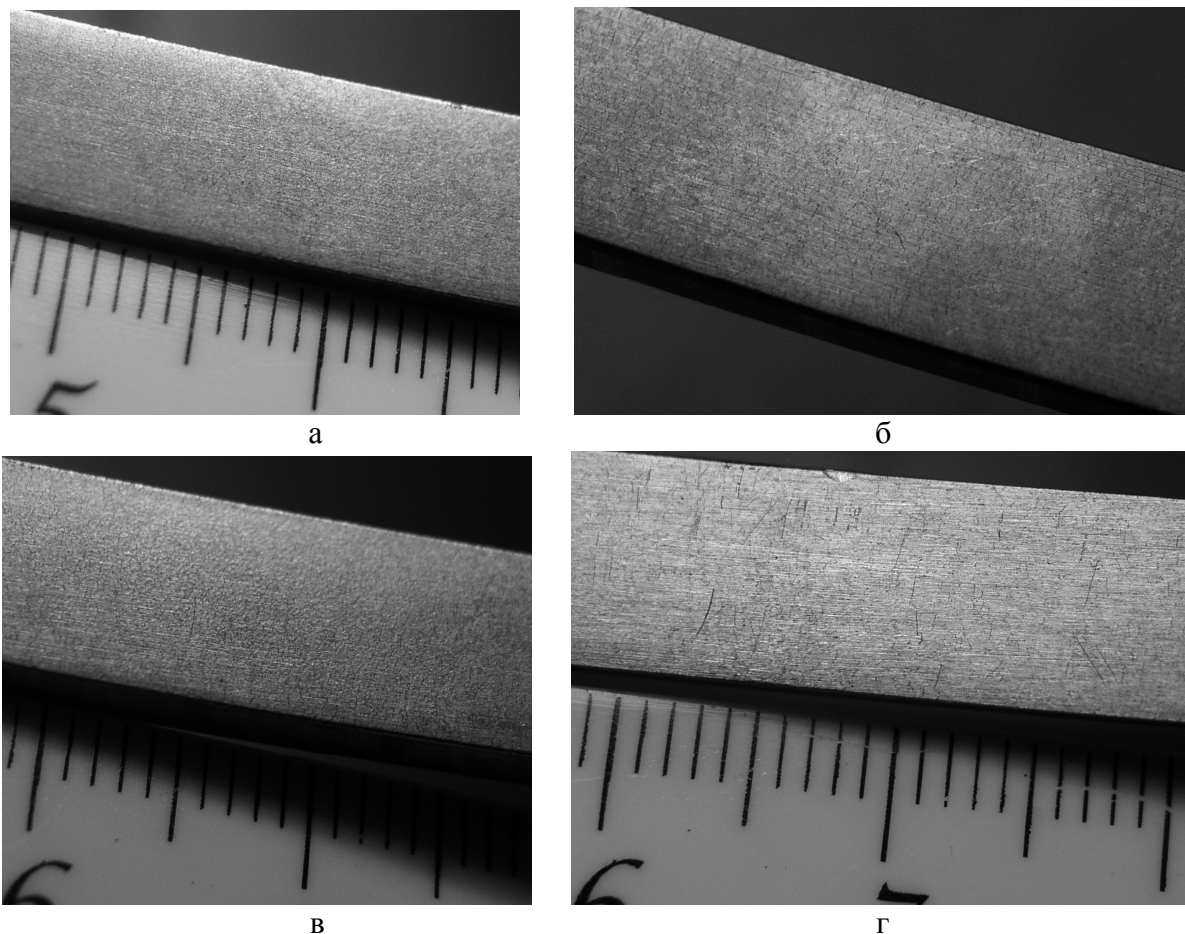


Рис. 7. Поверхность образцов после напыления до обжата (а) и после обжата: б – ВП + КИБ; в – УЗУ(5 мин) + КИБ; г – УЗУ + гляцевание + КИБ

Следует отметить, что разрушение покрытий происходило только на поверхности образца, подвергнутой сжимающим нагрузкам.

Для оценки адгезионной прочности покрытия производили расчет сжимающих напряжений по формуле

$$\sigma = \varepsilon \cdot E,$$

где $E = 1,20 \cdot 10^5$ МПа – модуль упругости; ε – степень деформации, которая определяется по формуле

$$\varepsilon = f \frac{h}{l^2},$$

где f – величина прогиба (деформация) в центральной (исследуемой) части образца (рис. 8); $h = 3$ мм – толщина образца; $l = 40$ мм – длина исследуемой части образца.

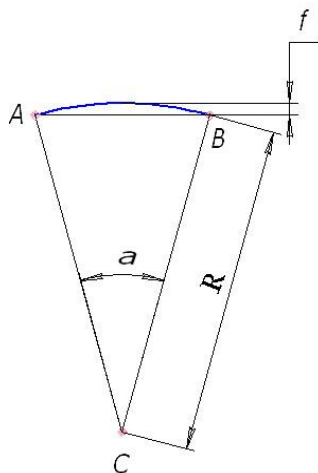


Рис. 8. Схема деформации образца при изгибе на ступенчатом валу

Результаты расчетов сжимающих напряжений представлены в табл. 4.

Как видно из табл. 4 адгезионная прочность увеличивается с 684 до 744 МПа (на 9 %) при применении УЗУ с последующим глянецованием до нанесения нитридтитанового покрытия.

Таблица 4. Результаты исследований адгезионной прочности

Метод комплексной обработки	α , град	AB , мм	f , мм	ε	R , мм	σ , МПа
ВП + КИБ	36,99	39,33	3,04	0,0057	62	684
УЗУ(5 мин) + КИБ	36,99	39,33	3,04	0,0057	62	684
УЗУ+глянецование + КИБ	40,92	39,149	3,322	0,0062	56	744

В серийном производстве лопатки I-й ступ. компрессора из сплава ВТ8М окончательно обрабатываются виброполированием с последующим нанесением ионно-плазменного покрытия TiN на верхнюю половину пера для повышения эрозионной стойкости. Ранее проведенные исследования лопаток с наработкой в пределах 1000... 1900ч показали, что эрозионные повреждения (каверны) на отдельных участках входной кромки и корыта наблюдаются и в нижней части пера у комля, где уровень циклических напряжений является максимальным. Наличие повреждений кромки радиусом $R = 0,25$ на расстоянии 27 мм от подошвы замка приводит к повышению уровня концентрации напряжений в два раза.

В связи с этим были проведены исследования выносливости лопаток, обработанных комплексными методами: ультразвуковое упрочнение с глянецованием кромок + нанесение покрытия TiN на перо лопатки. Ультразвуковое упрочнение выполняли по серийной технологии обработки лопаток III-й ступ. КНД двиг. Д-36 с уменьшением продолжительности от 10 мин (по серийной технологии) до 5 мин. При таком «щадящем» режиме можно исключить перенаклеп тонких кромок и обеспечить необходимые параметры поверхностного слоя. Нанесение покрытия TiN на все перо лопатки также производили по серийной технологии.

Испытаниям подвергали лопатки после непродолжительной наработки (наработка 883 ч), с последующим виброполированием для восстановления прочностных характеристик до уровня серийных лопаток.

Также была испытана партия лопаток после виброполирования с последующим нанесением покрытия на верхнюю половину пера, соответственно серийной технологии. Испытания на усталость выполняли стандартным методом на базе 100 млн. циклов (табл. 5, 6).

Таблица 5 – Результаты испытаний на усталость лопаток после ВП+УЗУ(5 мин)+КИБ

Шифр лопаток	Напряжение испытания, МПа	Число циклов, млн.	Примечание
8-5-3	660	10,35	Разр. по вх. кр. L = 5мм
8-5-2	660	35,2	Разр. по вх. кр. L = 6мм
8-5-1	660	100,0	Н. р.
8-5-7	640	10,76	Разр. по вых. кр на расст.10...20 мм отR _{пер}
8-5-8	640	100,0	
8-5-10	640	96,3	Разр. по вых. кр на расст.10...20 мм отR _{пер}
8-5-4	640	12,191	Разр. по вх. кр. L = 44 мм
8-5-5	640	9,194	Разр. по вх. кр. L = 41 мм
8-5-6	660	3,074	Разр. по вх. кр. L = 31 мм
8-5-9	620	100,0	Н. р.
8-5-11	620	100,0	Н. р.
8-5-12	620	100,0	Н. р.

Таблица 6 – Результаты испытаний лопаток (серийных) после ВП+напыление (КИБ) верхней половины пера

Шифр лопаток	Напряжение испытания, МПа	Число циклов, млн.	Примечание
С-1	580	18,1	Разр. по спинке, L = 23 мм
С-2	560	100,0	Н.р.
С-3	560	100,0	Н.р.
С-5	560	0,18	Разр. по спинке, L = 40 мм
С-6	540	86,4	Разр. по спинке, L = 32 мм
С-14	520	100,0	Н.р.
С-7	520	100,0	Разр. по спинке, L = 29 мм
С-19	520	100,0	Н.р.

Результаты испытаний лопаток на усталость на базе 100 млн цикл (табл. 5, 6) показали, что комплексное упрочнение (УЗУ + КИБ) приводит к повышению предела выносливости с 520 МПа (серийные лопатки с напылением верхней половины пера) до 620 МПа, т.е. на 19 %.

Выводы

Проведенные исследования характеристик поверхностного слоя и испытания на усталость показали, что комплексное упрочнение (ультразвуковое упрочнение шариками с гляцеванием кромок + нанесение покрытия TiN) лопаток I-ой ступ. компрессора двиг. ТВЗ-117 из сплава ВТ8М приводит к повышению адгезионной прочности покрытия и сопротивлению усталости.

Список литературы: 1. Ляшенко Б.А. Несущая способность материалов и конструктивных элементов с защитными покрытиями в экстремальных условиях эксплуатации: Автореф. дис-и докт. техн. наук. – Киев, 1976. – 55 с. 2. Аппен А.А. Основные физико-химические принципы создания жаростойких неорганических покрытий // Жаростойкие покрытия. – Л.; М.: Наука, 1965. – С. 3-54. 3. H.W. King, T.A. Caughlin, D.R./Nagy. Residual – Stress, Hardness and Chemical – Stability of TiN Coatings // I. of Advanced Materials. 2001, v. 33, is 1, p. 63-68. 4. О снижении остаточных напряжений в вакуум-плазменных покрытиях. Ляшенко Б.А., Рутковский А.В., Сорока Е.Б., Липинская Н.В. // Пробл. прочности, 2001. – № 4. – С. 62-68. 5. Методы испытания и контроля исследования машиностроительных материалов / Под общ. ред. А. Т. Туманова. – М.: Машиностроение, 1974. – Т. 1. – 320 с.

Сдано в редакцию 12.05.06

Рекомендовано д.т.н., проф. Михайлов А.Н.

ДВОШАРОВІ ЕЛЕКТРОДИ-ІНСТРУМЕНТИ ДЛЯ РОЗМІРНОЇ ОБРОБКИ ЕЛЕКТРИЧНОЮ ДУГОЮ ТОРЦЕВИХ ПОВЕРХОНЬ СКЛАДНОГО РЕЛЬЄФУ

Боков В. М. (КНТУ, м. Кіровоград, Україна)

A high-performance method of dimensional arc processing of intricate profile faceplates based on using two-ply tool electrodes is introduced.

В сучасному інструментальному та основному виробництвях при виготовленні порожнин кувальних штампів, прес-форм та оригінальних деталей широко застосовуються методи електроерозійної обробки. Найбільш поширеним з них є електроімпульсна обробка. Вона дозволяє отримати практично будь-яку за формою торцеву поверхню складного рельєфу поза залежністю від механічних властивостей матеріалу, що обробляється [1, с. 66-76]. Електроди-інструменти для електроімпульсної обробки виготовляють із вуглеграфіту або із міді [2, с. 5], причому форма робочої (торцевої) поверхні електрода-інструмента еквідистантна формі торцевої поверхні виробу та відрізняється від останньої в кожній точці на величину міжелектродного зазору. Процес, як відомо, реалізовується при поступальному русі електрода-інструмента, із зануренням робочої зони в рідину-діелектрик та з використанням нестационарних форм електричних розрядів [3, с. 83-85].

В зв'язку з тим, що енергія в зону обробки вводиться дискретно (порціями) та з відносно великими паузами, продуктивність електроімпульсної обробки дуже низька. Крім того, технічні складності отримання електричних імпульсів при силі струму більш 300 А суттєво обмежують потужність введеної енергії в робочу зону, що ще більше обмежує продуктивність обробки.

За роботами [4, 5] відомий високопродуктивний спосіб розмірної обробки металів електричною дугою, в якому енергія вводиться в зону обробки неперервно. Останнє підтверджується осцилограмами сили технологічного струму, який не падає до нуля, та зварювальними випрямлячами постійного струму, що використовуються при реалізації даного способу. Даний спосіб може бути застосований для розмірної обробки поверхонь складного рельєфу при поступальному русі вуглеграфітового електрода-інструмента та нерухомому електроді-заготовки, але обмеженої складності. Це пов'язано з тим, що розмірна обробка даним способом можлива лише тоді, коли на