

*В роботі подано експериментальні дані вимірювань величини руйнування деяких титанових сплавів, легованих Al, V, Mo та покриттів системи Ti-Al, одержаних за допомогою вакуумного дугового розряду (ВДР) при дії на них кавітації. Встановлено залежність швидкості руйнування поверхневих шарів сплавів та покриттів від часу та інтенсивності дії кавітації. Одержано аналітичне співвідношення між швидкістю руйнування сплавів і їх мікротвердістю. Показана можливість збільшити стійкість сплавів при дії кавітації вдвічі шляхом нанесення на їх поверхню покриття системи Ti-Al із ерозійної плазми ВДР*

*Ключеві слова: титанові сплави, Ti-Al покриття, кавітація, дія, руйнування, мікротвердість, взаємозв'язок*

*В работе представлены экспериментальные данные измерения величины разрушения при воздействии кавитации на ряд титановых сплавов, легированных Al, V, Mo и покрытий системы Ti-Al, формируемых с помощью вакуумного дугового разряда (ВДР). Установлена зависимость скорости разрушения поверхностных слоев сплавов и покрытий от времени и интенсивности кавитационного воздействия. Получено аналитическое соотношение между средней скоростью разрушения сплавов и их микротвердостью. Показана возможность повышения стойкости сплавов в 2 раза к воздействию кавитации путем нанесения на их поверхность покрытия системы Ti-Al из эрозионной плазмы ВДР*

*Ключевые слова: титановые сплавы, Ti-Al покрытия, кавитация, воздействие, разрушение, микротвердость, взаимосвязь*

УДК 621.793

DOI: 10.15587/1729-4061.2015.54118

# ИССЛЕДОВАНИЕ РАЗРУШЕНИЯ ЛЕГИРОВАННЫХ ТИТАНОВЫХ СПЛАВОВ ПРИ ВОЗДЕЙСТВИИ КАВИТАЦИИ

В. И. Коваленко

Научный сотрудник отдела\*

E-mail: kartmazov@kipt.kharkov.ua

В. Г. Маринин

Кандидат физико-математических наук,  
доцент, старший научный сотрудник\*

E-mail: marinin@kipt.kharkov.ua

\*Отдел интенсивных

вакуумно-плазменных технологий

Институт физики твердого тела,

материаловедения и технологий

Национальный научный центр

«Харьковский физико-технический институт»

ул. Академическая, 1,

г. Харьков, Украина, 61108

## 1. Введение

Повышение эксплуатационного ресурса деталей машин и механизмов, работающих в условиях воздействия разрушающих факторов, является на современном этапе одной из важнейших задач разработчиков оборудования. Поиск решения задачи, как правило, осуществляется в направлении создания и применения новых материалов или использования материалов ранее разработанных, но модифицируемых посредством термомеханической обработки и/или нанесением защитных покрытий. При этом в каждом конкретном случае учитывается специфика факторов, обуславливающих разрушение материала. В частности, при микроударном нагружении, создаваемом кавитацией, необходимо учитывать тот факт, что на поверхность материала действуют нагрузки, изменяющиеся со временем с большой скоростью, достигающие значений, сравнимых по величине с пределом прочности материала и локализованные в объемах, сравнимых с размером структурных составляющих материала. Реально такого рода воздействие вызывает эрозию, например, поверхностей деталей насосов, перекачивающих различные жидкости, гребных винтов, гильз

двигателей и др. Так как титановые сплавы обладают малым удельным весом, высокой удельной прочностью, жаропрочностью и коррозионной стойкостью, то представляется перспективным использование их взамен ранее применявшихся сталей при изготовлении такого рода деталей. При этом очевидно, необходимы данные о стойкости сплавов и покрытий на их основе в условиях воздействия кавитации.

## 2. Анализ литературных данных и постановка задачи

В настоящее время вопросам разработки эффективных способов повышения эксплуатационных свойств деталей из титана посвящено значительное число работ. В первую очередь исследовано влияние легирования на структуру и механические свойства исходных материалов. В этом направлении, в результате многочисленных исследований, разработано значительное число сплавов титана с различными структурами ( $\alpha$ ,  $\alpha+\beta$ ,  $\beta$ ), которые широко применяют в промышленности [1, 2]. Изучены свойства этих сплавов при статических нагрузках различных видов – циклических, при наличии

усталостных трещин и без таковых, при взрывном нагружении [3]. Однако исследования, направленные на получение данных о свойствах титановых сплавов в условиях воздействия на них высокоскоростных потоков макрочастиц и интенсивной кавитации, создающих микроударное нагружение поверхностей, ограничены. Необходимость таких исследований обусловлена значительной эрозией поверхности деталей из сплавов и, соответственно, уменьшением их эксплуатационного ресурса. Проведенные ранее исследования показали, что повышение эрозионной стойкости сплавов возможно при увеличении их твердости и износостойкости. С этой целью проведены исследования с использованием классической химико-термической обработки в среде аммиака или азота, обработки в тлеющем разряде, воздействия плазмы вакуумного дугового разряда [4–6]. Однако экспериментальные исследования показали, что из-за поглощения титаном водорода хрупкость изделий после азотирования в аммиаке значительно выше по сравнению с азотированием в азоте, что снижает его эффективность, несмотря на более высокую скорость процесса в этом случае. В работе [4] приведены справочные данные справочные данные о физико-механических свойствах ряда титановых сплавов после печного азотирования при 850 °С и 950 °С, которое вызывает снижение пластичности сплавов. Предложенный в работе [5] способ модификации титанового сплава путем облучения поверхности ионами легирующих элементов с энергией 300 кэВ и дозой  $2 \cdot 10^{19}$  ион/см<sup>2</sup> не может обеспечить необходимую прочность при эксплуатации вследствие малой глубины (до 2 мкм) модифицированного слоя.

В то же время способ повышения эрозионной стойкости материалов с использованием плазмы вакуумного дугового разряда обладает рядом преимуществ, так как позволяет в одном технологическом цикле наряду с азотированием наносить защитные, в частности эрозионно-стойкие покрытия различного состава [7, 8]. При этом покрытия системы Ti–Al, формируемые на поверхности титановых сплавов из плазмы ВДР, рассматриваются в качестве одного из вариантов повышения стойкости сплавов. Необходимость более детального исследования характеристик таких покрытий, что отмечалось ранее в работах [7, 8], обусловлена проведением различными фирмами конструкторско-технологических разработок по изготовлению лопаток повышенной длины для паровых турбин мощных энергоблоков АЭС и ТЭС, что иллюстрирует табл. 1.

Таблица 1

Основные характеристики рабочих лопаток проектируемых турбин

Разработчик	Длина, мм	Материал	Площадь выходного потока, м <sup>2</sup>	Линейная скорость на периферии лопатки, м/с
ЛМЗ	1500	Титан	17,9	832
Siemens	1423	Титан	16,0	785
Mitsubishi	1372	Титан	14,6	747
Alstom	1360	Титан	14,7	754

Данные таблицы показывают, что скорости столкновения сконденсированных капель влаги с поверхностью рабочих лопаток последних ступеней проектируемых мощных паровых турбин превышают 750 м/с.

При этом возникает потребность в их защите от эрозии, обусловленной микроударным воздействием.

### 3. Цель и задачи исследования

Целью работы является получение количественных данных о величине разрушения ряда сплавов титана и покрытий системы Ti–Al при микроударном нагружении, создаваемом кавитацией.

Для достижения поставленной цели были поставлены следующие задачи:

- установить зависимость величины эрозии (разрушения) образцов от времени воздействия кавитации;
- получить вакуумно-дуговые покрытия системы Ti–Al;
- определить микротвердость массивных образцов сплавов титана и покрытий системы Ti–Al.

### 4. Оборудование и методика исследования эрозии поверхностных слоев легированных титановых сплавов

Измерения величины разрушения, обусловленной воздействием кавитации, проведены на установке, описанной в работе [9]. Схема основного узла, обеспечивающего создание кавитационной зоны, приведена на рис. 1.

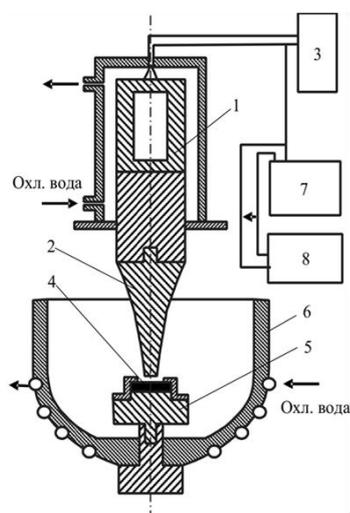


Рис. 1. Принципиальная схема экспериментального стенда для проведения сравнительной оценки эрозионной стойкости различных лопаточных материалов и противозэрозионных защитных покрытий: 1 – УЗ преобразователь; 2 – концентратор; 3 – генератор УЗ колебаний; 4 – экспериментальный образец; 5 – держатель; 6 – испытательная камера; 7 – осциллограф; 8 – частотомер

Для создания кавитационной зоны в жидкости использованы ультразвуковые волны от генератора УЗГ. Сигнал от генератора подается на магнитострикционный преобразователь, механически соединенный с концентратором экспоненциального профиля. Под торцевой поверхностью концентратора, установленном в сосуд с водой, формируется зона с развитой кавитацией. В этой зоне на расстоянии 0,55 мм от торцевой поверхности концентратора установлены исследуемые

образцы. Амплитуда колебаний торцевой поверхности концентратора составляет  $30 \pm 2$  мкм, а частота 20 кГц. Измерение потерь массы образца в результате кавитационной эрозии проведены с использованием гравиметрического метода. Точность измерения весовых потерь равна  $\pm 0,015$  мг. По данным измерений величины весовых потерь в зависимости от времени воздействия кавитации построены кинетические кривые разрушения материала образцов. При этом в качестве характеристики разрушения использована средняя по зоне воздействия кавитации глубина разрушения  $h$  (мкм).

Для некоторых образцов измерен абразивный износ по схеме плоскость-диск. Диск изготовлен из материала с жестко закрепленными абразивными частицами. Скорость движения поверхности диска равна 4,38 м/с при нагружении плоского образца 2,2 Н [10]. Покрытия получены применением вакуумного дугового разряда. Вакуумную камеру откачивали до остаточного давления  $1,33 \cdot 10^{-3}$  Па. В процессе нанесения покрытий давление изменялось до  $5 \dots 6 \cdot 10^{-3}$  Па. Покрытия из эрозионной плазмы, генерируемой катодами вакуумно-дугового разряда, осаждали на подложки, изготовленные из стали 1Х18Н10Т. Проведены эксперименты по получению покрытий на подложках, установленных на оси и вдоль линии перпендикулярной оси вакуумной камеры на различных расстояниях от оси. При этом плоскости подложек и катодов были параллельны, либо составляли угол  $45^\circ$  при осаждении Ti и Al покрытий. При формировании Ti-Al покрытий катоды расположены под углом  $90^\circ$  друг к другу и одновременно под углом  $45^\circ$  к подложкам, установленным вдоль линии перпендикулярной оси системы. Ток дугового разряда при нанесении Ti покрытия  $J_d = 100$  А, а алюминиевого – 70 А, отрицательный потенциал на подложке 100 В. Микротвердость массивных образцов и покрытий измеряли на приборе ПМТ-3. Структуру покрытий изучали на металлографических шлифах при помощи световой микроскопии. Рентгеноструктурные исследования проведены на дифрактометре ДРОН-3. Основные характеристики образцов приведены в табл. 2 (размеры в мм).

Таблица 2

Состав и микротвердость образцов

№ п/п	Сплав, форма образца	Состав легирующих элементов	$H_u$ , ГПа
1	Иодидный Ti, диск, $\varnothing 20, h=5$	–	1,46
2	Лист, $16 \times 12 \times 3,8$ (С)	Al – 0,4; Zr – 0,1	2,1
3	BT1-0, $\varnothing 20; h=5$	Fe – 0,3; Si – 0,1	2,4
4	Лист $15 \times 12 \times 4$ (Ст.)	Al – 6,1; Mo – 2,8; Zr – 0,5; Si – 0,3; Fe – 0,3	3,4
5	Пруток $\varnothing 8$ (Т)	Al – 4,5; V – 2,1; Zn – 2,8; Pb – 0,4	3,8
6	Лист $15 \times 12 \times 4$ (З)	Al – 3,3; V – 4,6; Si, Cr – 0,1; Co – 1,7	3,44
7	Лист $15 \times 12 \times 4$ (Б)	Al – 3,8; V – 0,6; Mo – 2,65	4,2

Данные, представленные в табл. 2, показывают, что легирование титана повышает его твердость. Все сплавы, приведенные в таблице, имеют более высокую твердость по сравнению с нелегированным титаном марки BT1-0. Наибольшее увеличение микротвердости наблюдается при легировании сплава алюминием и молибденом. При этом максимально допустимое количество алюминия не должно превышать 6 % (по массе). Одновременное наличие в сплаве алюминия, ванадия,

молибдена обеспечивает достаточно высокую прочность сплава. Степень упрочнения обуславливается искажением кристаллической решетки титана, величина которой определяется отличием атомного радиуса элемента замещения от атомного радиуса титана.

### 5. Экспериментальные результаты и их обсуждение

На рис. 2 представлены кинетические кривые разрушения для массивных образцов из сплавов Ti, характеристики которых приведены в табл. 2.

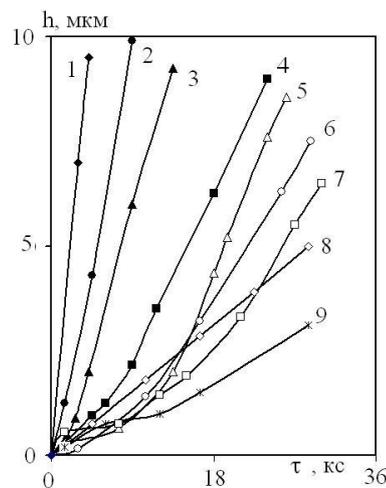


Рис. 2. Зависимость средней глубины разрушения ( $h$ ) титановых сплавов от времени воздействия кавитации. 1,3–5,8 – при амплитуде колебаний излучателя  $A=30$  мкм; 2,6,7,9 – при  $A=20$  мкм. Номера кривых соответствуют номерам образцов табл. 1, кр. 8 – образец 5 после деформации; 9 – образец 5

Данные рис. 2 показывают, что у большинства кинетических кривых существует временной интервал с небольшой величиной разрушения, предшествующий интервалу установившегося разрушения, которое с ростом времени кавитационного воздействия возрастает по квазилинейному закону. Средняя скорость разрушения за исследованный временной интервал зависит от амплитуды колебаний поверхности излучателя (интенсивности кавитации). Для сплава (№ 5, табл. 2) эту зависимость можно представить аналитическим соотношением:  $V = 0,044e^{0,1A}$ . Очевидно, что для различных сплавов численные значения коэффициентов отличаются. Также имеет место зависимость скорости разрушения от микротвердости сплава. На рис. 3 представлена соответствующая зависимость для сплавов, исследованных при амплитуде колебаний излучателя 20 мкм.

Из рис. 3 видно, что изменение средней скорости разрушения сплавов при воздействии кавитации в зависимости от их исходной микротвердости может быть приближенно представлено функциональной зависимостью типа  $V = aH_u^n$ , где  $a=28,4$ ,  $n=-2,9$ ,  $H_u$  измеряется в ГПа. Полученная зависимость отличается от установленных авторами ранее взаимосвязей между скоростью разрушения при кавитации и микротвердостью для технических чистых металлов и вакуумно-дуговых покрытий значениями коэффициентов при  $H_u$  [11]. Для металлов соотношение имеет вид  $V = c \cdot H_u^{-3,6}$ , а

для покрытий –  $V = q \cdot H_m^{-2.6}$ . Вычисленный коэффициент коррекции Пирсона для первой зависимости равен 0,956, а средняя квадратичная ошибка выборочного коэффициента корреляции  $\sigma_r = 0,015$ . Для  $t \pm \sigma_r$  при  $t = 2,5$  значение интеграла вероятности  $\Phi(t) = \frac{2}{\sqrt{2\pi}} \int e^{-t^2/2} dt$  равно 0,9876, и коэффициент корреляции в генеральной совокупности будет находиться в интервале  $0,9183 \leq r \leq 0,9938$ . Аналогичные вычисления проведены и для покрытий. Различие в показателях степени при  $H_m$  возможно обусловлено характером перехода материала в состояние предразрушения при ударном нагружении (волны Релея, ударные волны), что требует специальных исследований.

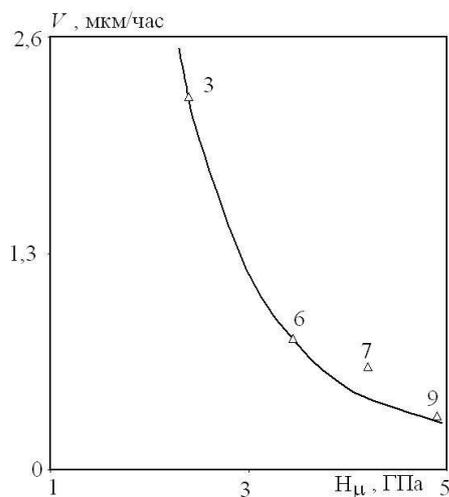


Рис. 3. Зависимость средней скорости разрушения (V) титановых сплавов при кавитации (A=20 мкм) от их микротвердости (H<sub>μ</sub>). Экспериментальные точки соответствуют номерам кривых в табл. 2

Металлографический анализ зоны разрушения в процессе ее формирования при воздействии кавитации показывает, что в первую очередь разрушается α-твердый раствор сплава. Под действием микроударов, возникающих при захлопывании кавитационных полостей, с увеличением времени воздействия кавитации разрушение распространяется на все зерно. Разрушение двухфазных сплавов α+β также начинается с α-твердого раствора, т. к. β-фаза оказывает наибольшее сопротивление разрушению по сравнению с α-фазой. Деформационное упрочнение обеспечивает небольшое (~20 %) увеличение стойкости сплавов к разрушению.

Для увеличения стойкости поверхностных слоев титановых сплавов апробированы покрытия системы Ti-Al, формируемые с применением ВДР. Покрытия наносили, используя поток эрозионной плазмы из одного катода из сплава Ti-Al или из двух раздельно Ti и Al катодов. Результаты исследований величины разрушения полученных покрытий представлены на рис. 4.

Данные рис. 4 показывают, что покрытия только из Al (2–4) имеют высокие скорости разрушения. Скорость разрушения покрытия, нанесенного на подложку, установленную на оси камеры (2) в 1,4 раза выше скорости разрушения покрытия (4), осажденного на подложку, отстоящую от оси на расстоянии 140 мм, что определяется, очевидно, изменением количества

атомов внедрения в покрытиях. Титановые покрытия с дополнительно введенным Al имеют меньшие скорости разрушения. При одинаковых параметрах ВДР существенное влияние оказывает величина давления в вакуумной камере. Покрытия, осажденные при более высоком давлении, имеют низкую эрозионную стойкость (кр. 5, 6). С увеличением тока титанового катода (J<sub>д</sub><sup>Ti</sup>) при постоянном токе алюминиевого катода (J<sub>д</sub><sup>Al</sup>) скорость разрушения формируемых покрытий толщиной 9–15 мкм уменьшается (кр. 7, 9, 10).

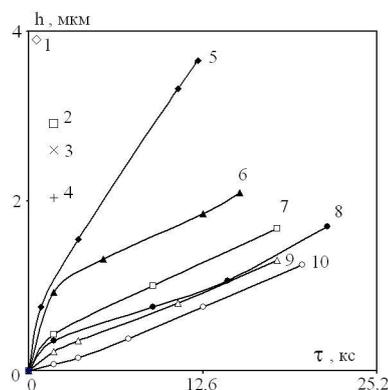


Рис. 4. Кинетические кривые разрушения при воздействии кавитации (A=30 мкм) покрытий Al (2–4), Ti-Al (5–7, 9, 10), катод Ti-Al (8). Условия формирования покрытий: отрицательный потенциал подложки 200 В и ток на Al катоде J<sub>д</sub><sup>Al</sup> = 70 А (3, 5–7, 9, 10); ток на Ti катоде J<sub>д</sub><sup>Ti</sup> = 100 (5, 6, 10), 85 (7), 120 А (9); давление газа в вакуумной камере 8 · 10<sup>-3</sup>, 7 · 10<sup>-3</sup>, 4,6 · 10<sup>-3</sup>, 4,5 · 10<sup>-3</sup>, 0,8 Па, соответственно, для образцов 2–4, 3, 6, 7, 9, 10. Для 1–4 значения h уменьшены в 5 раз, а для 5 в 2 раза

Исследование абразивного износа покрытий системы Ti-Al и только из Ti, которые нанесены на подложки при близких параметрах ВДР показали, что скорость износа покрытий Ti-Al в 2,5...3 раза меньше титановых. Однако по отношению к нитрид титановым покрытиям стехиометрического состава (TiN) они менее стойкие, т. к. скорость абразивного износа более чем в 2 раза выше.

## 6. Выводы

1. Средняя скорость разрушения при кавитации исследованных титановых сплавов зависит от амплитуды колебаний излучателя (A), создающего кавитационную зону, и зависимость может быть представлена аналитическим соотношением  $V = B \cdot e^{\gamma A}$ , где B, γ – константы для данного материала (для сплава ВТ1-0 B=0,044, γ=0,1).

2. Функциональная зависимость V от величины микротвердости исследованных легированных титановых сплавов может быть в первом приближении представлена в виде  $V = aH_m^n$ , где a=28,4, n=-2,9, H<sub>μ</sub> измеряется в ГПа, что коррелирует с ранее полученными данными для технически чистых металлов.

3. Покрытия толщиной до 15 мкм, полученные на основе Ti с добавками Al, имеют среднюю скорость разрушения при воздействии кавитации равную 0,25 мкм/час, что в 2,6 раза меньше минимального значения для массивных образцов, т. е. они могут быть использованы для их защиты.

## Література

1. Пульцин, М. Н. Титановые сплавы и их применение в машиностроении [Текст] / М. Н. Пульцин. – М. : Машгиз, 1962. – 167 с.
2. Глазунов, С. Г. Конструкционные титановые сплавы [Текст] / С. Г. Глазунов, В. Н. Моисеев. – М. : Металлургия, 1974. – 368 с.
3. Колачев, Б. А. Физические основы разрушения титана [Текст] / Б. А. Колачев, А. В. Мальков. – М. : Металлургия, 1983. – 160 с.
4. Химико-термическая обработка металлов и сплавов [Текст] : справ. / под ред. Л. С. Ляховича. – М. : Металлургия, 1981. – 420 с.
5. Способ модификации поверхности титановых сплавов. Патент РФ МПК C23C14/48 [Текст] / Гусева М. И., Смыслов А. М., Сафин Э. В., Измайлова Н. Ф. – № 2117073; заявл. 08.07.1997; опубл. 10.08.1998, Бюл. № 22.
6. Аксенов, И. И. Вакуумная дуга: источники плазмы, осаждение покрытий, поверхностное модифицирование [Текст] / И. И. Аксенов, А. А. Андреев, В. А. Белоус, В. Е. Стрельницкий, В. М. Хорошин. – Киев : Наукова думка, 2012. – 727 с.
7. Картмазов, Г. Н. Коррозионно-эрозионностойкие покрытия для рабочих лопаток паровых турбин [Текст] / Г. Н. Картмазов, Ю. В. Лукирский, Г. В. Кирик, В. Г. Маринин, Ю. И. Поляков, А. А. Дейнека // Наука та інновації. – 2012. – Т. 8, № 3. – С. 17–22. doi: 10.15407/scin8.03.017
8. Васильев, В. В. Структура и механические свойства многокомпонентных покрытий на основе TiN и TiAlN, легированных Y, Re, Ni, Cr, Si, Mo [Текст] / В. В. Васильев, В. И. Коваленко, А. А. Лучанинов, В. Г. Маринин, Е. Н. Решетняк, В. Е. Стрельницкий, Г. Н. Толмачев // Актуальные проблемы прочности: тез. докл. 55 Междунар. конф. – Харьков, 2014. – С. 140.
9. Коваленко, В. И. Обладнання для дослідження ерозії покриттів при мікро ударному діянні [Текст] / В. И. Коваленко, В. Г. Маринин // Вопросы атомной науки и техники. Серия ФРП и РМ. – 1998. – Вып. 5 (71). – С. 83–85.
10. Коваленко, В. И. Исследование стойкости к эрозии поверхностных слоев сталей при воздействии кавитации [Текст] / В. И. Коваленко, Л. И. Мартыненко, В. Г. Маринин // Восточно-Европейский журнал передовых технологий. – 2015. – Т. 2, № 5 (74). – С. 23–27. doi: 10.15587/1729-4061.2015.40196
11. Маринин, В. Г. Взаємозв'язок кавітаційної стійкості та мікротвердості покриттів [Текст] / В. Г. Маринин // Вопросы атомной науки и техники. Серия Вакуум, чистые материалы, сверхпроводники. – 2009. – Вып. 6 (64). – С. 181–183.

**Розроблена проста для використання та енергетично доцільна нанотехнологія борування деталей з легованої сталі 30ХГСА, яка скорочує тривалість обробки при одержанні високоякісних боридних шарів. Виконана математична обробка результатів дозволяє визначати конкретні температуру та тривалість борування виходячи з заданої глибини шару боридів. Розрахунок коефіцієнту дифузії бору підтвердив прискорення процесу у 3 рази**

**Ключові слова:** борування, сталь, дифузійні шари, мікротвердість, глибина шару, математична модель, номограма

**Разработана простая для использования и энергетически целесообразная нанотехнология борирования деталей из легированной стали 30ХГСА, которая сокращает продолжительность обработки при получении высококачественных боридных слоев. Выполненная математическая обработка результатов позволяет определять конкретные температуру и длительность борирования исходя из заданной глубины слоя боридов. Расчет коэффициента диффузии бора подтвердил ускорение процесса в 3 раза**

**Ключевые слова:** борирование, сталь, диффузионные слои, микротвердость, глубина слоя, математическая модель, номограмма

УДК 621.785.53

DOI: 10.15587/1729-4061.2015.55015

## РОЗРОБКА ШВИДКІСНОЇ ТЕХНОЛОГІЇ БОРУВАННЯ ЛЕГОВАНОЇ СТАЛІ

К. О. Костик

Кандидат технічних наук, доцент  
Кафедра ливарного виробництва  
Національний технічний університет  
«Харківський політехнічний інститут»  
вул. Фрунзе, 21,  
м. Харків, Україна, 61002  
E-mail: eklitus@yandex.ru

### 1. Вступ

Одним з найефективніших засобів підвищення терміну служби деталей машин є їх поверхневе зміцнення, яке значно підвищує зносостійкість, міцність, опір деталі руйнуванню.

В наш час відомі різні методи поверхневого зміцнення: поверхнева термічна обробка, механічне зміцнення (наклеп), електроіскрова обробка, наплавка, наварка і різні види хіміко-термічної обробки.

Широко застосовуються в промисловості такі види хіміко-термічної обробки, як цементація, азотування та борування. Основним недоліком традиційних методів є значна тривалість процесів та необхідність у використанні спеціального складного обладнання [1].

Одним з актуальних питань є розробка нових швидкісних методів борування. Вирішення цього питання сьогодні досягається використанням методів борування при індукційному, іонно-плазмозомовому, лазерному нагріванні та у віброкиплячому шарі, що дозволяє