

## Деформация прецизионных деталей топливной аппаратуры дизелей при восстановлении методом диффузионной металлизации

**Михаил Никитьевич Ерохин<sup>1</sup>**,  
академик РАН, доктор технических наук, профессор,  
e-mail: n.erohin@rgau-msha.ru;  
**Сергей Павлович Казанцев<sup>1</sup>**,  
доктор технических наук, профессор,  
e-mail: kspts@bk.ru;

**Александр Геннадиевич Пастухов<sup>2</sup>**,  
доктор технических наук, профессор,  
e-mail: pastuhov\_ag@bsaa.edu.ru;  
**Дмитрий Михайлович Скороходов<sup>1</sup>**,  
кандидат технических наук, доцент,  
e-mail: d.skorokhodov@rgau-msha.ru;  
**Константин Михайлович Логачев<sup>1</sup>**,  
аспирант, e-mail: klogachyov@mail.ru

<sup>1</sup>Российский государственный аграрный университет – МСХА имени К.А. Тимирязева, Москва, Российская Федерация;

<sup>2</sup>Белгородский государственный аграрный университет имени В.Я. Горина, Белгородская область, Российская Федерация

**Реферат.** Отметили, что износ рабочих поверхностей плунжера и втулки ухудшают экономические и экологические показатели дизельного двигателя. Указали на экономическую целесообразность восстановления работоспособности с повышением их износостойкости дорогостоящих плунжерных пар. Предложили решить эту задачу методом диффузионной металлизации, чтобы получить упрочняющие покрытия на основе карбидов, нитридов и боридов железа и легирующих элементов. (*Цель исследования*) Оценить влияние температурных режимов на деформацию плунжеров при диффузионном борировании. (*Материалы и методы*) В качестве параметров технологического процесса приняли: состав порошковой смеси, температуру и время выдержки, время охлаждения контейнеров, толщину покрытия, прогиб детали. Исследовали материалы: сталь 45, сталь ХВГ, сталь 25Х5МА после азотирования в среде диссоциированного аммиака на заводе-изготовителе топливной аппаратуры. (*Результаты и обсуждение*) Измерили толщину боридного слоя при 8-часовом борировании: 250; 215 и 170 микрометров соответственно. Выявили, что каждые 2 часа процесса дают приращение слоя в среднем на 40 микрометров. Измерили среднюю величину прогиба плунжеров, борированных 2 и 6 часов, после 8-часового охлаждения контейнеров: 9,8 и 12,7 микрометра. Отметили, что увеличение скорости охлаждения контейнера усиливает коробление плунжеров до 35 микрометров. Для равномерного прогрева рекомендовали использовать контейнеры, вмещающие не более 100 плунжеров. (*Выводы*) Выявили главную причину деформации (прогиба) плунжеров после диффузионной металлизации, которая заключается в релаксации внутренних напряжений в сердцевине детали в результате структурных изменений в стали. Установили, что минимальное время охлаждения контейнеров вместе с печью должно составлять не менее 8 часов, тогда прогиб не превышает 20 микрометров. Достигли возможности уменьшить припуск на механическую обработку плунжера до 30 микрометров. **Ключевые слова:** прецизионные детали, плунжерная пара, восстановление работоспособности изношенных плунжерных пар, диффузионная металлизация, упрочняющие покрытия, деформация плунжеров.

■ **Для цитирования:** Ерохин М.Н., Казанцев С.П., Пастухов А.Г., Скороходов Д.М., Логачев К.М. Деформация прецизионных деталей топливной аппаратуры дизелей при восстановлении методом диффузионной металлизации // *Сельскохозяйственные машины и технологии*. 2022. Т. 16. №3. С. 4-11. DOI 10.22314/2073-7599-2022-16-3-4-11. EDN DXVZBU.

## Deformation of Precision Parts in Diesel Fuel Equipment During Diffusion Metallization

**Mikhail N. Erokhin<sup>1</sup>**,  
Dr.Sc.(Eng.), professor, member of the Russian Academy  
of Sciences, e-mail: n.erohin@rgau-msha.ru;  
**Sergey P. Kazantsev<sup>1</sup>**,  
Dr.Sc.(Eng.), professor, e-mail: kspts@bk.ru;

**Alexander G. Pastukhov<sup>2</sup>**,  
Dr.Sc.(Eng.), professor, e-mail: pastuhov\_ag@bsaa.edu.ru;  
**Dmitriy M. Skorokhodov<sup>1</sup>**,  
Ph.D.(Eng.), associate professor,  
e-mail: d.skorokhodov@rgau-msha.ru;  
**Konstantin M. Logachev<sup>1</sup>**,  
Ph.D. student, e-mail: klogachyov@mail.ru



<sup>1</sup>Russian State Agrarian University – Moscow Timiryazev Agricultural Academy, Moscow, Russian Federation;

<sup>2</sup>Belgorod State Agricultural University named after V. Gorin, Mayskiy, Belgorod region, Russian Federation

**Abstract.** The deterioration of the plunger working surfaces and sleeve worsens the economic and environmental performance of the diesel engine. Therefore, restoring the performance of worn plunger pairs with an increase in their wear resistance is economically feasible. The problem is proposed to be solved by the method of diffusion metallization to obtain hardening coatings based on iron carbides, nitrides and borides and alloying elements. (*Research purpose*) To evaluate the effect of temperature regimes on the deformation of the plungers during diffusion boriding. (*Materials and methods*) The following parameters of the technological process are accepted: the composition of the powder mixture, the temperature and exposure time, the cooling time of the containers, the thickness of the coating, the deflection of the part. The materials under research are 45steel, KhVG steel, 25Kh5MA steel after nitriding in dissociated ammonia at the fuel equipment manufacturer. (*Results and discussion*) The thickness of the boride layer obtained after 8-hour boriding is 250; 215 and 170 micrometers, respectively. It is found that every 2 hours of the process result in an average layer increment of 40 microns. The average deflection of the plungers, exposed to 2-hour and 6-hour boriding, is 9.8 and 12.7 micrometers after the 8-hour cooling of containers. It is found that an increase in the cooling rate of the container leads to an increase in the warping of the plungers up to 35 microns. For uniform heating, it is recommended to use containers containing no more than 100 plungers. (*Conclusions*) The main reason for the deformation (deflection) of plungers after diffusion metallization is detected to be the relaxation of internal stresses in the core of the part as a result of structural changes in the steel. It is established that the minimum cooling time of the containers together with the furnace should be at least 8 hours. In this case, the deflection does not exceed 20 micrometers. It has been made possible to reduce the allowance for mechanical processing of the plunger to 30 microns.

**Keywords:** precision parts, plunger pair, restoration of worn plunger pairs, diffusion metallization, hardening coatings, plunger deformation, microhardness.

■ **For citation:** Erokhin M.N., Kazantsev S.P., Pastukhov A.G., Logachev K.M. Deformatsiya pretsizionnykh detaley toplivnoy apparatury dizeley pri vosstanovlenii metodom diffuzionnoy metallizatsii [Deformation of precision parts in diesel fuel equipment during diffusion metallization]. *Sel'skokhozyaystvennyye mashiny i tekhnologii*. 2022. Vol. 16. N3. 4-11 (In Russian). DOI 10.22314/2073-7599-2022-16-3-4-11. EDN DXVZBU.

Диффузионные покрытия на основе карбидов нитридов, боридов железа и легирующих элементов отличаются высокой износ- и коррозионной стойкостью. При относительно небольшой толщине упрочняющего покрытия они могут быть рекомендованы для восстановления прецизионных деталей топливной аппаратуры дизелей.

При восстановлении плунжерных пар методом порошковой диффузионной металлизации карбидохромовыми, хромонитридными или железоборидными покрытиями для упрощения технологии и улучшения качества механической обработки предпочтительнее наносить покрытие на плунжер [1, 2]. Эта деталь имеет меньшие размеры и более доступные наружные поверхности. Отверстие втулки можно подвергать только механической обработке до выведения следов износа.

Увеличение диаметра плунжера должно быть достаточным для компенсации износа направляющих поверхностей втулки и плунжера, припуска на механическую обработку с учетом перешлифовки плунжеров в другие группы и коробления после диффузионной металлизации [3, 4]:

$$\Delta d = 2(I_{вт} + I_{пл}) + \Pi_{вт} + \Pi_{пл} + 2f, \quad (1)$$

где  $\Delta d$  – необходимое увеличение диаметра плунжера, мм;

$I_{вт}$ ,  $I_{пл}$  – величина наибольшего местного износа направляющей поверхности втулки и плунжера, мм;

$\Pi_{вт}$ ,  $\Pi_{пл}$  – припуск на механическую обработку деталей плунжерной пары, мм;

$f$  – прогиб (деформация) плунжера, мм.

Следует учитывать, что увеличение толщины покрытий более 150 мкм, имеющих микротвердость в пределах 14 000–19 000 МПа, приводит к образованию трещин. Это ограничивает применение диффузионных покрытий как метода восстановления плунжерных пар топливных насосов высокого давления. Поэтому актуальна разработка технологических мероприятий по снижению прогиба плунжера после диффузионной металлизации.

Известно, что наибольшей деформации при химико-термической обработке подвергаются длинные тонкие стержни. Прогиб плунжеров при температуре диффузионной металлизации, достигающей 1180°C, практически неизбежен и в ряде случаев может привести к неисправимому браку.

Причина прогиба – в градиенте температуры от поверхности к сердцевине изделия из-за высокой скорости и неравномерности нагрева и охлаждения садки в электрической печи. Это приводит к неодновременному расширению внешних и внутренних объемов металла из-за структурных изменений [5–7]. При нагреве плунжеров происходит значительное сниже-

ние модуля упругости сердцевины, что вызывает релаксацию внутренних напряжений. Структурные изменения влияют на удельный объем в стальных изделиях [8-11].

К числу факторов, увеличивающих коробление, относится различие физико-механических свойств на границе «покрытие – плунжер», в том числе различие коэффициентов линейного расширения [13-15]. В нашем случае плунжеры имеют осесимметричную форму, что при равномерном нанесении упрочняющего покрытия и оптимальных скоростях нагрева и охлаждения должно способствовать уравниванию изгибающих моментов.

На величину коробления плунжеров при порошковых методах диффузионной металлизации влияют также способ упаковки и их расположение в контейнере.

Использование способов восстановления деталей с помощью диффузионной металлизации лимитирует число восстанавливаемости любых прецизионных деталей, в том числе и игл распылителя форсунок. Их восстановление возможно, если толщина диффузионного слоя больше величины прогиба деталей, возникшего из-за высокотемпературной термообработки [16, 17].

Прогиб плунжера – причина разнотолщинности упрочняющего покрытия после шлифования (рис. 1). В случае значительного прогиба плунжера  $f$  с радиусом кривизны  $R$  при последующей механической обработке возможно появление зон со снятым упрочняющим слоем  $\Delta_{\min} \leq 0$ .

Устранить прогиб возможно путем увеличения толщины  $\Delta_{\max}$  наносимого покрытия до значений, превышающих величину самого прогиба  $f$ . Последующая механическая обработка плунжеров на бесцентровых шлифовальных станках устраняет прогиб вследствие уменьшения толщины нанесенного износостойкого слоя.

Кроме того, после применения механической обработки появляется смещение оси прецизионной детали  $\Delta r$ . Это особенно критично для иглы распылителя форсунки. Возникает биение иглы в корпусе распылителя из-за несоосности запирающего конуса иглы с запирающим гнездом корпуса распылителя, наблюдается неперпендикулярность торца иглы к торцу форсунки. Таким образом, при восстановлении распылителей форсунок биение запирающего гнезда корпуса и конуса иглы взаимосвязано с разнотолщинностью  $\Delta_{\min}$  и  $\Delta_{\max}$ .

При диффузионных методах получения упрочняющего покрытия наибольшая величина микротвердости всегда наблюдается с поверхности. Например, диффузионный слой на основе карбидов хрома в поверхностной зоне имеет наибольшую концентрацию хрома и полезные сжимающие напряжения. Поэтому при механической обработке удаляется наиболее эф-

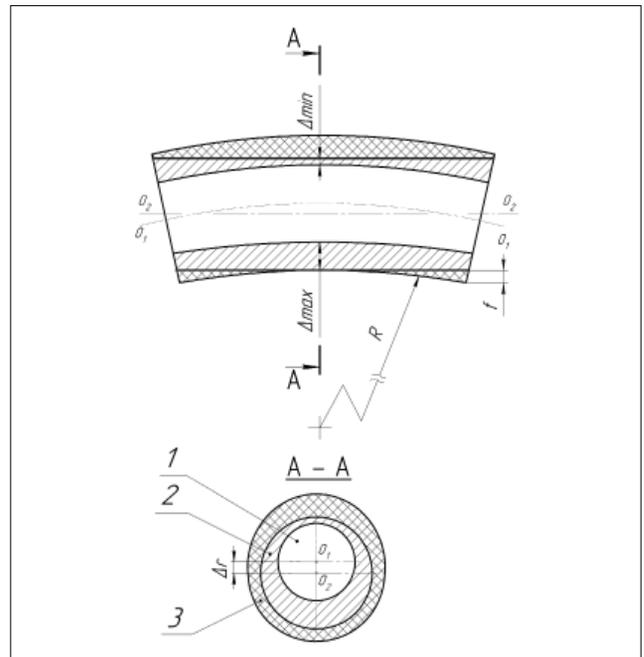


Рис. 1. Прогиб плунжера и разнотолщинность упрочняющего покрытия после шлифования: 1 – плунжер; 2 – упрочняющее покрытие после шлифования; 3 – припуск на шлифование;  $f$  – прогиб плунжера, мм;  $R$  – радиус кривизны, мм;  $\Delta_{\max}$ ,  $\Delta_{\min}$  – максимальная и минимальная толщина покрытия, мм;  $O_1$ ,  $O_2$  – ось вращения, соответственно после диффузионной металлизации и шлифования;  $\Delta r$  – ось смещения, мм

Fig. 1. Plunger deflection and thickness variation of hardening coating after grinding: 1 – plunger; 2 – hardening coating after grinding; 3 – allowance for grinding;  $f$  – plunger deflection, mm;  $R$  – curvature radius mm;  $\Delta_{\max}$ ,  $\Delta_{\min}$  – maximum and minimum coating thickness, mm;  $O_1$ ,  $O_2$  – axis of rotation, after diffusion plating and grinding, respectively;  $\Delta r$  – displacement axis, mm

фективная по износо- и коррозионной стойкости часть диффузионного слоя. Микротвердость покрытия зависит от толщины диффузионного слоя (рис. 2).

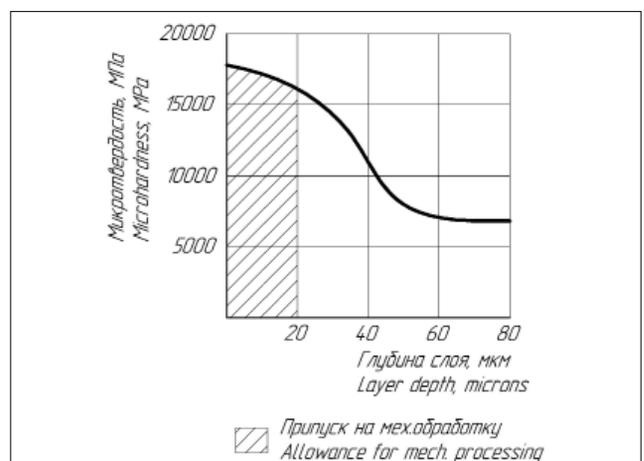


Рис. 2. Изменение микротвердости по глубине диффузионного слоя на стали ХВГ

Fig. 2. Change in microhardness by the depth of the diffusion layer on KhVG steel



Механическая обработка при устранении коробления удаляет самый твердый слой покрытия. Чем больше припуск, тем ниже микротвердость оставшегося покрытия. Чем выше температура нанесения износостойких покрытий, тем заметней изменения в кристаллической решетке металла и больше прогиб прецизионных деталей. Главная причина прогиба связана с воздействием температуры и неодновременным тепловым расширением внешних и внутренних объемов металла при нагреве и охлаждении. Прогиб по этой причине неизбежен и необратим. Однако на его величину можно влиять, изменяя температуру нагрева и скорость охлаждения.

Таким образом, можно уменьшить несоосность прецизионных деталей топливной аппаратуры, разнотолщинность упрочняющего диффузионного покрытия и его различную поверхностную твердость.

Влияние перечисленных факторов будет минимальным, если изменить температуру процесса, скорость нагрева и охлаждения деталей, схему упаковки контейнеров и т.д.

**Цель исследования** – оценить влияние температурных режимов на деформацию плунжеров при диффузионном борировании.

**Материалы и методы.** Диффузионное упрочняющее покрытие получали методом борирования порошковым методом в электрической печи сопротивления СНОЛ-1,6.2,5.1/9 в контейнерах с плавким затвором. Температурно-временной режим поддерживался автоматически с точностью  $\pm 5^\circ\text{C}$ .

Состав смеси, % (по массе): 65%  $\text{B}_4\text{C}$ , 35%  $\text{Al}_2\text{O}_3$ . Эксперименты по определению толщины диффузионного слоя в зависимости от времени насыщения проводили на образцах из стали 45, стали 25Х5М и ХВГ диаметром 8 мм с чистой поверхности  $Ra$  0,1 мкм. Температура диффузионного борирования составляла  $980^\circ\text{C}$ , время выдержки – 2; 4; 6 и 8 ч.

Микрошлифы опытных образцов изготавливали по методике в соответствии с ГОСТ 1778 (ИСО 4967-79). Толщину диффузионного боридного слоя определяли на микроскопе ПМТ-3.

Исследования по определению прогиба проводились на плунжерах, имеющих соотношение длины цилиндрической поверхности к ее диаметру 7:1.

Плунжеры подвешивали в вертикальном положении в кассетах и устанавливали в контейнер, изготовленный из жаропрочной стали 18ХГТ (рис. 3). Все засыпали порошковой смесью. Рабочее пространство изолировали асбестовой прокладкой и слоем измельченной натрий-силикатной глыбы для создания плавкого затвора. Контейнер закрывается стальной крышкой.

Эксперименты проводили в трех партиях по 50 деталей при различных режимах выдержки и охлаждения (таблица, рис. 4).

Контейнеры № 1 и № 2 после диффузионного бо-

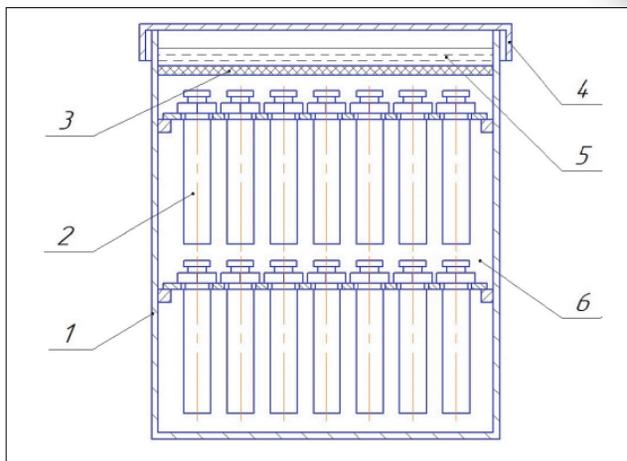


Рис. 3. Схема упаковки контейнера: 1 – контейнер; 2 – плунжеры; 3 – прокладка асбестовая; 4 – крышка; 5 – затвор плавкий; 6 – смесь порошковая

Fig. 3. Container packing diagram: 1 – container; 2 – plungers; 3 – asbestos gasket; 4 – cap; 5 – flat shutter; 6 – powder mixture

Таблица		Table	
РЕЖИМЫ ДИФФУЗИОННОГО БОРИРОВАНИЯ MODES OF DIFFUSION BORATION			
№	Температура борирования, °C Boration temperature, °C	Время выдержки, ч Exposure time, h	Время охлаждения, ч Cooling time, h
1	980	2	8
2	980	6	8
3	980	6	2

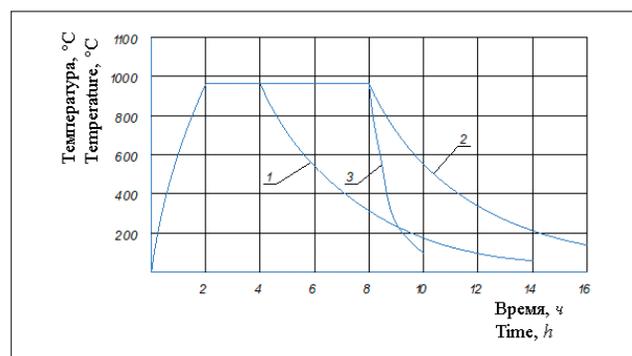


Рис. 4. Режимы нагрева, выдержки и охлаждения контейнеров  
Fig. 4. Modes of heating, holding and cooling of containers

рирования охлаждали вместе с печью. Контейнер № 3 охлаждали на воздухе.

Для определения температуры внутри контейнеров применяли вольфрам-рениевые термопары, которые вставляли через керамические трубки.

После распаковки контейнеров и очистки деталей стрелу прогиба  $f$  измеряли на призмах-ножах с ис-

пользованием индикаторной головки МИГ-1 с ценой деления 0,001 мм.

**РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ.** Из теории упругости известно, что действие внутренних напряжений вызывает упругое удлинение и изгиб цилиндрического стержня (рис. 5).

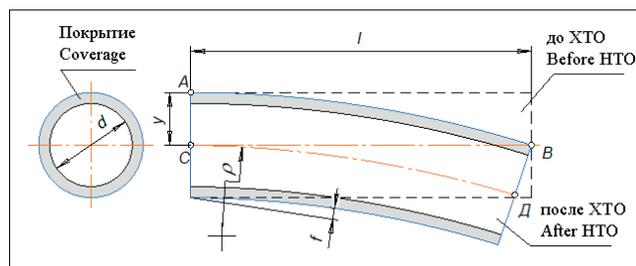


Рис. 5. Схема деформации (прогиба) цилиндрической детали после химико-термической обработки

Fig. 5. Diagram of a cylindrical part deformation (deflection) after chemical-thermal treatment

Кривизну цилиндрической детали определяли по формуле:

$$\frac{1}{\rho} = \frac{y\sigma(1-\mu)}{E}, \quad (2)$$

где  $y$  – расстояние от поверхности детали АВ до нейтрального слоя СД, мм;

$\rho$  – радиус кривизны нейтрального слоя, мм;

$\sigma$  – напряжения в стальном изделии, вызывающие изгибающий момент, МПа;

$E$  – модуль упругости стали, МПа;

$\mu$  – коэффициент Пуассона.

Известно, что наибольшее напряжение при изгибе возникает на поверхности цилиндрического изделия, то есть на расстоянии, равном радиусу:

$$y_{\max} = \frac{d}{2}, \quad (3)$$

где  $d$  – диаметр стержня, мм.

Тогда выражение (2) примет вид:

$$\frac{1}{\rho} = \frac{2\sigma(1-\mu)}{Ed}. \quad (4)$$

Прогиб  $f$  на заданной длине  $l$  можно определить по формуле:

$$f \approx \frac{l^2}{8\rho}. \quad (5)$$

Окончательно на основе положения теории упругости получим уравнение для определения прогиба (коробления) плунжера:

$$f = \frac{l^2\sigma(1-\mu)}{4Ed}. \quad (6)$$

Внутренние напряжения – главная причина прогиба плунжеров, при прочих равных условиях прямо

пропорционального квадрату длины и обратно пропорционального диаметру и модулю упругости стали [2, 18, 19].

Таким образом, уменьшение внутренних напряжений в плунжерах после диффузионной металлизации будет способствовать уменьшению прогиба. Необходимо определить влияние толщины упрочняющего покрытия и скорости охлаждения деталей на величину прогиба.

Толщина боридного слоя (покрытия) на стали марок 45, 25Х5МА и ХВГ изменяется в зависимости от времени диффузионного насыщения при температуре 980°C (рис. 6). Из стали ХВГ изготавливают плунжерные пары 4УТНМ-1111410-01 (НЗТА).

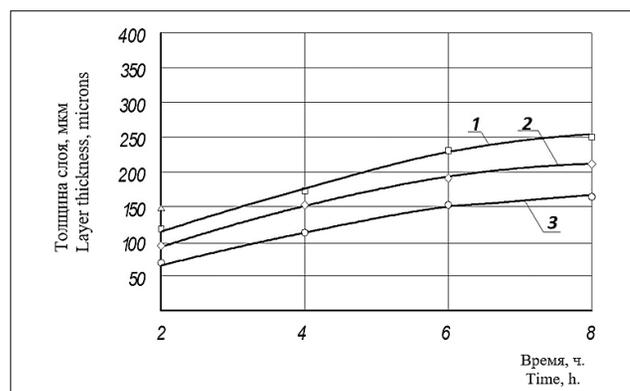


Рис. 6. Зависимость толщины боридного слоя от времени насыщения (при 980°C): 1 – сталь 45; 2 – сталь 25Х5МА; 3 – сталь ХВГ

Fig. 6. Dependence of the boride layer thickness on the saturation time (980°C): 1 – steel 45; 2 – 25X5MA steel; 3 – HVG steel

Кривые имеют параболический характер. Толщина боридного слоя после 8 ч борирования составляет, соответственно, 250, 215 и 170 мкм. Каждые 2 ч процесса дают приращение слоя в среднем на 40 мкм.

Распределение прогиба плунжеров Н01.111150 из стали 25Х5М (ЯЗДА) после процесса диффузионного борирования зависит от режима выдержки и охлаждения (рис. 7).

Анализ результатов измерений прогиба деталей показал, что увеличение времени выдержки диффузионного борирования не оказывает существенного влияния на его величину. Это можно объяснить большим соотношением толщины диффузионного слоя к диаметру плунжера.

Средняя величина прогиба плунжеров, борированных 2 и 6 ч, после охлаждения контейнеров в течение 8 ч составляет 9,8 и 12,7 мкм, а максимальная достигает 20 мкм. Увеличение скорости охлаждения контейнера усиливает коробление плунжеров до 35 мкм.

Таким образом, припуск на механическую обработку плунжера можно нивелировать на величину  $2\Delta f$ , то есть на 30 мкм, что позволит уменьшить раз-

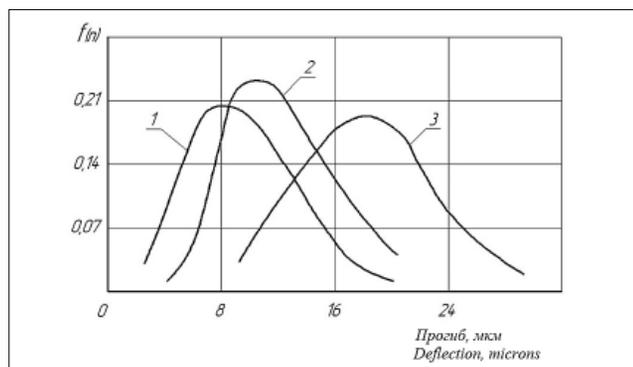


Рис. 7. Распределение прогиба плунжеров после борирования (при 980°C): 1 – выдержка 2 ч, охлаждение 8 ч; 2 – выдержка 6 ч, охлаждение 8 ч; 3 – выдержка 6 ч, охлаждение 2 ч

Fig. 7. Distribution of plunger deflection after boration (treatment temperature – 980 °C): 1 – exposure 2 h, cooling 8 h; 2 – exposure 6 h, cooling 8 h, 3 – exposure 6 h, cooling 2 h

нотолщинность упрочняющего покрытия после шлифования и улучшить его качество. Минимальное время охлаждения контейнеров вместе с печью должно составлять не менее 8 ч.

Для равномерного прогрева следует использовать контейнеры, вмещающие не более 100 плунжеров.

### Выводы

1. Главная причина деформации (прогиба) плунжеров после диффузионной металлизации заключается в релаксации внутренних напряжений в сердцевине детали в результате структурных изменений в стали.

2. Величина прогиба зависит от скорости охлаждения деталей. Максимального значения она достигает 35 мкм при охлаждении контейнеров на воздухе в течение 2 ч.

3. Рекомендуемое время охлаждения контейнеров при диффузионной металлизации в порошках должно составлять не менее 8 ч вместе с печью. В этом случае прогиб не превышает 20 мкм, то есть разница  $\Delta f$  с временем охлаждения 2 ч составит 15 мкм.

4. Припуск на механическую обработку плунжера можно сократить на величину  $2\Delta f$ , то есть на 30 мкм. Это позволит уменьшить разнотолщинность упрочняющего покрытия после шлифования.

### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Леонтьев Л.Б., Шапкин Н.П., Леонтьев А.Л. Формирование износостойких покрытий на прецизионных узлах трения // *Металлообработка*. 2011. N3. С. 14-17.
2. Козинцев Н.П. Упрочнение плунжерных пар топливных насосов высокого давления // *Актуальные проблемы гуманитарных и естественных наук*. 2016. N11-4. С. 16-18.
3. Ерохин М.Н., Казанцев С.П. Диффузионные покрытия в ремонтном производстве. М.: Минсельхоз РФ, МГАУ им. В.П. Горячкина. 2006. 124 с.
4. Ерохин М.Н., Казанцев С.П., Чупятков Н.Н. Технологическое оснащение процесса получения металлических покрытий CVD-методом металлоорганических соединений // *Вестник Федерального государственного образовательного учреждения высшего профессионального образования "Московский государственный агроинженерный университет имени В.П. Горячкина"*. 2018. N6(88). С. 40-44.
5. Лялякин В.П. Восстановление деталей машин в агропромышленном комплексе. Современные тенденции в научном обеспечении агропромышленного комплекса. Коллективная монография. Под редакцией В.В. Окоркова. Иваново. 2019. С. 254-258.
6. Erokhin M., Pastukhov A., Golubev I., Kazantsev S. Theoretical basis of justification of electromechanical hardening modes of machine parts. *Engineering for Rural Development*. 2020. N19. 147-152.
7. Лялякин В.П., Костюков А.Ю., Даниличев И.И. Восстановление нижней головки "колотых" шатунов // *Технический сервис машин*. 2021. N4(145). С. 111-118.
8. Лебедев А.Т., Лебедев П.А. Восстановление работоспособности плунжерных пар // *Механизация и электрификация сельского хозяйства*. 2010. N1. С. 23-24.
9. Лебедев А.Т., Болотоков А.Л., Лебедев П.А. Повышение долговечности распылителей форсунок автотракторных дизелей // *Вестник АПК Ставрополя*. 2018. N2(30). С. 34-37.
10. Лебедев А.Т., Лебедев П.А., Губжиков Х.Л., Болотоков А.Л. Улучшение показателей эффективности использования энергетических средств с дизельными двигателями модернизацией распылителей форсунок // *Наука в центральной России*. 2018. N5(35). С. 71-77.
11. Лебедев А.Т., Лебедев П.А., Васин В.А. Повышение эффективности работы топливной аппаратуры дизельных двигателей // *Тракторы и сельхозмашины*. 2011. N7. С. 43-45.
12. Denisov V.A., Kataev Yu.V., Gerasimov V.S., Mishina Z.N., Pmukhametov A.F. Justification of the permissible values system of machine parts parameters during their technical service. *AIP Conference Proceedings*. 2021. 2402. 070042.
13. Катаев Ю.В., Малыха Е.Ф., Вялых Д.Г. Организация технического сервиса машинно-тракторного парка на региональном уровне // *Наука без границ*. 2017. N11(16). С. 60-64.
14. Семенова Е.Е., Борисов Г.А., Миронов В.В. Повышение ресурса прецизионных деталей дизельной топливной аппаратуры нанесением на их поверхность гальванозофазного хрома: Монография. Рязань: РГАТУ им. П.А. Костычева. 2011. 172 с.
15. Болотоков А.Л. Исследование влияния технического состояния распылителя на работоспособность форсунок дизеля // *Известия Кабардино-Балкарского государственного университета*. 2010. N1. С. 23-24.

ственного аграрного университета им. В.М. Кокова. 2019. N3(25). С. 73-77.

16. Васильев А.Е., Голубев И.Г. Инновационные технологии для восстановления деталей к зарубежной сельскохозяйственной технике // *Труды ГОСНИТИ*. 2015. Т. 118. С. 176-179.
17. Саматов З.А., Шарифуллин С.Н., Адигамов Н.Н., Адигамов Н.Н. Высокоэффективные технологии в восстановлении и упрочнении ответственных элементов машин и механизмов // *Современные проблемы науки и об-*

разования. 2014. N3. С. 22-29.

18. Lyalyakin V.P., Aulov V.F., Ishkov A.V., Kravchenko I.N., Kuznetsov Y.A. Properties of Wear-Resistant Composite Coatings Produced by High-Speed Boronizing. *Journal of Machinery Manufacture and Reliability*. 2022. N51(2). 134-142.
19. Lyalyakin, V.P., Slinko, D.B. Active Control of the Inside Diameter of Diesel Engine Cylinder Liners during Their Honing. *Russian Metallurgy (Metally)*. 2020. N13. 1623-1626.

## REFERENCES

1. Leont'ev L.B., Shapkin N.P., Leont'ev A.L. Formirovanie iznosostoykikh pokrytiy na pretsizionnykh uzlakh treniya [Formation of wear-resistant coatings on precision friction units]. *Metalloobrabotka*. 2011. N3. 14-17 (In Russian).
2. Kodintsev N.P. Uprochnenie plunzhernykh par toplivnykh nasosov vysokogo davleniya [Hardening of plunger pairs of high pressure fuel pumps]. *Aktual'nye problemy gumanitarnykh i estestvennykh nauk*. 2016. N11-4. 16-18 (In Russian).
3. Erokhin M.N., Kazantsev S.P. Diffuzionnye pokrytiya v remontnom proizvodstve [Diffusion coatings in the repair industry]. Moscow: Minselfkhoz RF, MGAU named after V.P. Goryachkin. 2006. 124 (In Russian).
4. Erokhin M.N., Kazantsev S.P., Chupyatov N.N. Tekhnologicheskoe osnashchenie protsessa polucheniya metallicheskikh pokrytiy CVD-metodom metalloorganicheskikh soedineniy [Technological equipment for obtaining metal coatings by decomposing metalorganic compounds with cvd method]. *Vestnik Federal'nogo gosudarstvennogo obrazovatel'nogo uchrezhdeniya vysshego professional'nogo obrazovaniya "Moskovskiy gosudarstvennyy agroinzhenernyy universitet named after V.P. Goryachkin"*. 2018. N6(88). 40-44 (In Russian).
5. Lyalyakin V.P. Vosstanovlenie detaley mashin v agropromyshlennom komplekse. Sovremennye tendentsii v nauchnom obespechenii agropromyshlennogo kompleksa. Kollektivnaya monografiya [Restoration of machine parts in the agro-industrial complex. Modern trends in the scientific support of the agro-industrial complex. Collective monograph]. Edited by V.V. Okorkov. Ivanovo: 2019. 254-258 (In Russian).
6. Erokhin, M., Pastukhov, A., Golubev, I., Kazantsev, S. Theoretical basis of justification of electromechanical hardening modes of machine parts. *Engineering for Rural Development*. 2020. N19. 147-152 (In English).
7. Lyalyakin V.P., Kostyukov A.Yu., Danilichev I.I. Vosstanovlenie nizhey golovki "kolotykh" shatunov [Restoration of the lower head of "chipped" connecting rods]. *Tekhnicheskii servis mashin*. 2021. N4(145). 111-118 (In Russian).
8. Lebedev A.T., Lebedev P.A. Vosstanovlenie rabotosposobnosti plunzhernykh par [Restoration of plunger pairs]. *Mekhanizatsiya i elektrifikatsiya sel'skogo khozyaystva*. 2010. N1. 23-24 (In Russian).
9. Lebedev A.T., Bolotokov A.L., Lebedev P.A. Povyshenie dol-
- govechnosti raspyliteley forsunok avtotraktornykh dizeley [Increase of durability of injector nozzles automotive diesel engines]. *Vestnik APK Stavropol'ya*. 2018. N2(30). 34-37 (In Russian).
10. Lebedev A.T., Lebedev P.A., Gubzhokov H.L., Bolotokov A.L. Uluchshenie pokazateley effektivnosti ispol'zovaniya energeticheskikh sredstv s dizel'nymi dvigatelyami modernizatsiy raspyliteley forsunok [Improvement of indicators of efficiency of use energy products with diesel engines with the help modernization of sprayers nozzles]. *Nauka v tseentral'noy Rossii*. 2018. N5(35). 71-77 (In Russian).
11. Lebedev A.T., Lebedev P.A., Vasin V.A. Povyshenie effektivnosti raboty toplivnoy apparatury dizel'nykh dvigateley [Improving the efficiency of fuel injection equipment of diesel engines]. *Traktory i sel'khoz mashiny*. 2011. N7. 43-45 (In Russian).
12. Denisov V.A., Kataev Yu.V., Gerasimov V.S., Mishina Z.N., Ilmukhametov A.F. Justification of the permissible values system of machine parts parameters during their technical service. *AIP Conference Proceedings this link is disabled*. 2021. 2402. 070042 (In English).
13. Kataev Yu.V., Malykha E.F., Vyalykh D.G. Organizatsiya tekhnicheskogo servisa mashinno-traktornogo parka na regional'nom urovne [Organization of technical service of the machine and tractor fleet at the regional level]. *Nauka bez granits*. 2017. N11(16). 60-64 (In Russian).
14. Semenova E.E., Borisov G.A., Mironov V.V. Povyshenie resursa pretsizionnykh detaley dizel'noy toplivnoy apparatury naneseniem na ikh poverkhnost' gal'vanogazofaznogo khroma: Monografiya [Increasing the precision part durability of diesel fuel equipment by applying galvanic-gas-phase chromium to their surface: Monograph]. Ryazan': RGATU named after P.A. Kostychev. 2011. 172 (In Russian).
15. Bolotokov A.L. Issledovanie vliyaniya tekhnicheskogo sostoyaniya raspylitelya na rabotosposobnost' forsunki dizelya [A study of the influence of the technical condition of the sprayer on the performance of diesel injectors]. *Izvestiya Kabardino-Balkarskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta named after V.M. Kokov*. 2019. N3(25). 73-77 (In Russian).
16. Vasil'ev A.E., Golubev I.G. Innovatsionnye tekhnologii dlya vosstanovleniya detaley k zarubezhnoy sel'skokhozyaystvennoy tekhnike [Innovative technologies for the restoration of



- parts for foreign agricultural machinery]. *Trudy GOSNITI*. 2015. Vol. 118. 176-179 (In Russian).
17. Samatov Z.A., Sharifullin S.N., Adigamov N.N., Adigamov N.N. Vysokoeffektivnye tekhnologii v vosstanovlenii i uprochnenii otvetstvennykh elementov mashin i mekhanizmov [High technology restoration and strengthening of critical components machines and mechanisms]. *Sovremennye problemy nauki i obrazovaniya*. 2014. N3. 22-29 (In Russian).
18. Lyalyakin V.P., Aulov V.F., Ishkov A.V., Kravchenko I.N.,

Kuznetsov Y.A. Properties of Wear-Resistant Composite Coatings Produced by High-Speed Boronizing. *Journal of Machinery Manufacture and Reliability*. 2022. N51(2). 134-142 (In English).

19. Lyalyakin, V.P., Slinko, D.B. Active Control of the Inside Diameter of Diesel Engine Cylinder Liners during Their Honing. *Russian Metallurgy (Metally)*. 2020. N13. 1623-1626 (In English).

### Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

### Conflict of interest

The authors declare no conflict of interest.

### Заявленный вклад соавторов:

- Ерохин М.Н. – научное руководство, формулирование основных целей и задач экспериментальных исследований, доработка текста;
- Казанцев С.П. – формулирование основных направлений и обоснование актуальности исследования, постановка проблемы, подготовка начального варианта статьи, доработка текста;
- Пастухов А.Г. – формирование общих выводов, доработка текста и литературный анализ;
- Скороходов Д.М. – обработка полученных результатов экспериментальных исследований, построение графиков, итоговая переработка статьи;
- Логачев К.М. – подготовка и проведение экспериментальных исследований, построение графиков, редактирование и оформление материалов.
- Авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.*

### Coauthors' contribution:

- Erokhin M.N. – scientific guidance, formulating the main goals and objectives of experimental research, the manuscript revision;
- Kazantsev S.P. – formulation of the main research concepts, substantiation of the research relevance, problem statement, preparation of the manuscript initial version, the manuscript revision;
- Pastukhov A.G. – formation of general conclusions, the manuscript revision and literature review;
- Skorokhodov D.M. – processing the experimental study results obtained, plotting, the manuscript final revision;
- Logachev K.M. – preparing and conducting the experimental studies, plotting, proofreading.
- The authors read and approved the final manuscript.*

Статья поступила в редакцию  
Статья принята к публикации

The paper was submitted to the Editorial Office on  
The paper was accepted for publication on

16.05.2022  
02.09.2022