

Malunhoctpontejibhbie Texhojiornn

УДК 621.785.5

В.М. КОНСТАНТИНОВ, д-р техн. наук, проф. заведующий кафедрой «Материаловедение в машиностроении»<sup>1</sup> E-mail: vm.konstantinov@bntu.by

B.A. ЛЕШОК аспирант<sup>1</sup> E-mail: leshok.vlad@tut.by

О.П. ШТЕМПЕЛЬ, канд. техн. наук, доц. доцент кафедры автомобильного транспорта<sup>2</sup> E-mail: o.shtempel@psu.by

<sup>1</sup>Белорусский национальный технический университет, г. Минск, Республика Беларусь <sup>2</sup>Полоцкий государственный университет имени Евфросинии Полоцкой, г. Новополоцк, Республика Беларусь

Поступила в редакцию 07.08.2023.

# АНАЛИЗ ВЛИЯНИЯ ПРЕДВАРИТЕЛЬНОЙ И ЦИКЛИЧЕСКОЙ ПЛАСТИЧЕСКОЙ ДЕФОРМАЦИИ НА ХИМИКО-ТЕРМИЧЕСКУЮ ОБРАБОТКУ КОНСТРУКЦИОННЫХ СТАЛЕЙ

Предметом исследования являлись термодиффузионные азотированные и силицированные слои на сталях, полученные после пластической деформации. Изучено влияние предварительной пластической деформации на низкотемпературный процесс азотирования и циклической пластической деформации на высокотемпературный процесс силицирования. Полученные результаты представляют интерес для ускорения производственных процессов химико-термической обработки сталей. Установлено, что предварительная поверхностная пластическая деформация способствует интенсификации процесса ионно-плазменного азотирования конструкционной стали. Наличие высокотемпературной циклической пластической деформации обеспечивает интенсификацию диффузионных процессов при рассасывании диффузионного силицированного слоя на конструкционной стали.

**Ключевые слова:** пластическая деформация, интенсификация химико-термической обработки, азотирование, силицирование, конструкционная сталь

DOI: https://doi.org/10.46864/1995-0470-2024-1-66-37-42

Введение. С момента возникновения промышленных способов химико-термической обработки (XTO) в XIX веке проблема сокращения длительности процесса привлекает внимание научно-технического сообщества [1]. Особенно остро она заявила о себе на рубеже веков. Предложены многочисленные варианты ускорения XTO: от экзотической радиационной обработки до оплавления поверхности и механического перемешивания порошковой насыщающей смеси [2–4]. Ряд из них нашли промышленное применение. Яркими примерами таких технологий являются ионно-плазменное азотирование (ИПА) и вакуумная цементация [5–6].

К сожалению, многие технологические приемы ускорения XTO так и остались на лабораторном уровне. Причина очевидна: промышленная технология ускоренного XTO должна обеспечивать, как минимум, технологическую реализуемость, стабильность и воспроизводимость в промышленных условиях. Поэтому нынешний этап исследований в обсуждаемой области характеризуется ярко выраженной практической направленностью [7].

С этих позиций перспективной представляется активация XTO поверхностной пластической деформацией (ППД). Известен эффект ускорения от предварительной пластической деформации [9–11]. Л.Г. Ворошниным с сотрудниками было установлено, что предварительная деформация стали до 70 % увеличивает толщину диффузионного слоя при борировании на 20-30 %. Предварительная пластическая деформация не только интенсифицирует процесс борирования, но и обеспечивает увеличение микротвердости диффузионного слоя. По мнению авторов, ускорение ХТО обусловлено наличием деформационных дефектов кристаллического строения [10]. Однако следует отметить, что предварительная пластическая деформация оказывает однократное воздействие из-за протекания рекристаллизационных процессов при температурах существенно выше температуры рекристаллизации. Анализ информационного фонда по влиянию деформации на ХТО дает основания полагать, что многократное протекание деформационных и рекристаллизационных процессов может дать более существенный эффект ускорения [10–13]. Важным при этом является соотношение температур рекристаллизации и ХТО. Для низкотемпературных процессов ХТО (цинкование, азотирование) возможно сохранение деформационных дефектов кристаллического строения в процессе и после ХТО. Для высокотемпературных процессов (цементация, борирование, силицирование) для обеспечения сохранения эффекта деформации, видимо, следует использовать постоянную циклическую деформацию при ХТО.

Цель работы — оценка влияния предварительной пластической деформации на низкотемпературный процесс азотирования и циклической пластической деформации на высокотемпературный процесс силицирования.

Материалы и методики проведения исследований. Азотирование стали 40ХМФА проводили на установке ИПА 0.361 в аргонно-водородной среде (540–560 °C). ППД была получена путем дробеструйной обработки. Диаметр дроби составлял 0,68 мм; скорость дроби — 50 м/с; материал дроби — сталь ШХ15. Степень деформации поверхности образцов до проведения ИПА составлял 20–30 %.

Влияние циклической пластической деформации на скорость диффузионных процессов изучали на образцах стали 10. Стандартные образцы подвергали диффузионному силицированию (1000 °C, 4,0 ч), а затем — диффузионному отжигу в вакууме на установке высокотемпературной металлографии ИМАШ АЛА-ТОО по следующим режимам:  900 °C, в течение 30 мин с наложением статической нагрузки, вызывающей напряжения растяжения 35 МПа;

- 900 °C, в течение 30 мин с наложением циклической нагрузки, вызывающей напряжения растяжения 0+35 МПа (30 циклов нагружения).

Металлографический анализ образцов был проведен с использованием оптического микроскопа Альтами МЕТ 3М, дополнительно имеющего в своем оснащении цифровую камеру и фотоадаптер. Рентгеноструктурный и микрорентгеноспектральный анализ проводили по общепринятым методикам.

Микродюрометрические исследования проводились по методу Виккерса на твердомере ПМТ-3М при нагрузке на индентор *P*, равной 50 г. Одной точке исследования соответствовало не менее 5 измерений.

Влияние ППД на ИПА конструкционной стали. Были изучены два режима обработки стали 40ХМФА. Первая половина образцов была подвержена стандартному, применяемому на большинстве предприятий, режиму ИПА. Следующая партия образцов была подвержена сначала предварительной ППД, а после — такому же режиму ИПА.

После ППД микротвердость поверхностного слоя ожидаемо возросла с 280–290 до 300–320 HV 0,05. Причины этого очевидны — наклеп и высокая плотность дислокаций. Повышение микротвердости составило 20–30 HV 0,05. После ИПА микродюрометрическая картина несколько изменилась (рисунок 1). Микротвердость азотированного слоя после ППД повысилась с 580–590 до 670–680 HV 0,05. Это увеличение присутствует на глубине 8–9 мкм. Глубже (более 10 мкм) микротвердость образцов примерно одинакова. Разница в микротвердости азотированного слоя до и после ИПА  $\Delta$ HV 0,05 = 90. Таким образом, ППД неаддитивно увеличивает микротвердость диффузи-



Рисунок 1 — Распределение микротвердости азотированного слоя на стали 40ХМФА: 1 — ИПА; 2 — предварительная ППД с последующим ИПА (ППД+ИПА); △НV 0,05 — прирост поверхностной микротвердости; *h*<sub>ппд</sub> — толщина упрочненного слоя Figure 1 — Distribution of microhardness of the nitrided layer on 40ХМФА (40KhMFA) steel: 1 — ion-plasma nitriding (IPN); 2 — preliminary surface plastic deformation (SPD) followed by IPN (SPD+IPN); △HV 0,05 — increase in surface microhardness; *h*<sub>ппд</sub> — thickness of the hardened layer

онного слоя после ИПА. Для стали 40ХМФА температура рекристаллизации находится в пределах 708–991 °С. Температура ИПА существенно ниже температур рекристаллизационных процессов стали 40ХМФА. Поэтому полный процесс рекристаллизации не происходит. При данных режимах обработки происходят только частично полигонизация и возврат. При этом дислокационная картина ППД сохраняется в значительной степени.

Есть основания полагать, что обнаруженное повышение микротвердости диффузионного слоя обусловлено не только сохранением наклепа от ППД, но и повышением концентрации азота в поверхностном слое. Это может быть обусловлено активацией сорбционных и диффузионных процессов за счет повышенной концентрации дислокаций. Известно ускорение диффузионных процессов по дислокациям [9, 11, 12, 14, 15]. Энергия активации диффузионных процессов в этом случае существенно ниже.

Влияние высокотемпературной циклической деформации на процесс силицирования. На следующем этапе был выполнен сравнительный анализ влияния пластической деформации на высокотемпературный процесс XTO (силицирование). Принципиальным отличием является наличие периодической высокотемпературной рекристаллизации. В этом случае решающее значение играет повторяющаяся пластическая деформация.

Анализ результатов распределения кремния в диффузионных слоях с их микротвердостью обнаружил отсутствие прямой корреляции между микротвердостью силицированного слоя образцов, подвергнутых различным видам обработки, и распределением кремния. Так, микротвердость силицидного слоя после циклической деформации заметно выше микротвердости слоя после отжига с постоянной нагрузкой при существенно более низкой концентрации кремния в слое. Это свидетельствует о различиях в структурообразовании при диффузионных процессах с наложением высокотемпературной циклической деформации и без нее.

При циклическом нагружении образца при отжиге в стали интенсивно протекают процессы периодической пластической деформации и динамической рекристаллизации [16]. Об этом свидетельствуют различия в микроструктурах образцов, отожженных с наложением циклической и статической нагрузок (рисунок 2), и повышение на 30 % остаточной пластической деформации (относительное удлинение) образцов, отожженных с циклическим нагружением. Увеличение толщины диффузионного слоя свидетельствует об ускорении диффузионных процессов более чем на 35 %. Как известно, механизм рекристаллизации близок к процессам самодиффузии. Кроме этого, при рекристаллизационном росте равновесных зерен происходит перемещение границ и увеличение их суммарной площади [17].

Анализ известных данных и ранее полученные экспериментальные результаты позволяют полагать, что интенсификация диффузионных процессов при циклическом деформировании стальных



Рисунок 2 — Микроструктуры силицированных образцов стали 10, ×200: *a* — силицированный образец (*t* = 1000 °C, τ<sub>выд</sub> = 4 ч) до деформации, толщина диффузионного слоя *h*<sub>1</sub> = 174 мкм; *b* — силицированный образец, подвергнутый диффузионному отжигу (*t* = 900 °C, τ<sub>выд</sub> = 0,5 ч) в вакууме с наложением постоянной нагрузки (σ = 35 МПа, ε = 7 %), толщина диффузионного слоя *h*<sub>2</sub> = 218 мкм; *c* — силицированный образец, подвергнутый диффузионному отжигу (*t* = 900 °C, τ<sub>выд</sub> = 0,5 ч) в вакууме с наложением постоянной нагрузки (σ = 35 МПа, ε = 7 %), толщина диффузионного слоя *h*<sub>2</sub> = 218 мкм; *c* — силицированный образец, подвергнутый диффузионному отжигу (*T* = 900°С, τ = 0,5 ч) в вакууме с наложением циклической нагрузки (σ<sub>max</sub> = 35 МПа, 30 циклов нагружения, ε = 33 %), толщина диффузионного слоя *h*<sub>3</sub> = 297 мкм

**Figure 2** — **Microstructures of silicified samples from steel 10**, ×200: *a* — a silicified sample (t = 1,000 °C,  $\tau_{max}$  = 4 h) before deformation, diffusion layer thickness  $h_1 = 174 \ \mu\text{m}$ ; *b* — a silicified sample subjected to diffusion annealing (*t* = 900 °C,  $\tau_{max}$  = 0.5 h) in vacuum with a constant load ( $\sigma$  = 35 MPa,  $\varepsilon$  = 7 %), the thickness of the diffusion layer  $h_2$  = 218  $\mu\text{m}$ ; *c* — a silicified sample subjected to diffusion annealing (*T* = 900 °C,  $\tau$  = 0.5 h) in vacuum with cyclic loading ( $\sigma_{max}$  = 35 MPa, 30 loading cycles,  $\varepsilon$  = 33 %), the thickness of the diffusion layer  $h_3$  = 297  $\mu\text{m}$ 

силицированных образцов связана со следующими явлениями:

 взаимодействием атомов кремния с дефектами кристаллической решетки, число которых возрастает;

 активной зернограничной диффузией кремния при увеличении протяженности границ зерен и полигонов;

 циклическими структурными превращениями при высокотемпературной динамической рекристаллизации по механизму, подобному диффузионному.

Анализ результатов распределения кремния в диффузионных слоях образцов, подвергнутых различным видам обработки, позволил установить следующее. При наложении циклической нагрузки происходит интенсификация процесса диффузионного испарения атомов кремния в техническом вакууме. Скорость процесса диффузионного испарения атомов легирующего элемента при отжиге с постоянной и циклической нагрузкой оценивали при помощи коэффициентов  $K_1$  и  $K_2$ соответственно [18]:

$$K_1 = \frac{S_1 - S_2 \cdot (1 + \varepsilon_2)}{S_1} \cdot 100 \%; \qquad (1)$$

$$K_{2} = \frac{S_{1} - S_{3} \cdot (1 + \varepsilon_{3})}{S_{1}} \cdot 100 \%,$$
 (2)

где  $S_1$  — площадь, ограниченная кривой 1 (рисунок 3), распределения кремния в диффузионном слое исходного образца;  $S_2$  — площадь, ограниченная кривой 2 (см. рисунок 3), распределения кремния в диффузионном слое в образце, отожженном с наложением статической нагрузки;  $\varepsilon_2$  — относительное удлинение образца, отожженного с наложением статической нагрузки;  $S_3$  — площадь, ограниченная кривой 3 (см. рисунок 3), распределения кремния в диффузионном слое в образце, отожженного с наложением статической нагрузки;  $S_3$  — площадь, ограниченная кривой 3 (см. рисунок 3), распределения кремния в диффузионном слое в образце, отожженном с наложением циклической нагрузки;  $\varepsilon_3$  — относительное удлинение образца, отожженном с наложением циклической нагрузки.

Коэффициенты  $K_1$  и  $K_2$  описывают относительное уменьшение количества кремния в диффузионных слоях и пропорциональны количеству кремния, перешедшего в окружающую среду. По расчетам  $K_1 = 3,4$  % и  $K_2 = 60,5$  %. При отжиге силицированных стальных образцов в вакууме с наложением статической нагрузки в окружающую среду переходит около 3,5 % кремния, а при наложении циклической нагрузки — 60 % кремния. Таким образом, циклическое пластическое деформирование углеродистой стали позволяет ускорить диффузию кремния как вглубь стали (более чем на 65 %), так и в наружную среду (в случае отжига в вакууме более чем в 16 раз).

Заключение. Предварительная поверхностная пластическая деформация в определенной степе-



Рисунок 3 — Распределение концентрации кремния (штриховые линии 1, 2, 3) и микротвердости силицированных слоев (сплошные линии 4, 5, 6) на стали 10: 1, 4 — в образце до обработки; 2, 5 — в образце после диффузионного отжига с наложенной постоянной нагрузкой; 3, 6 — в образце после диффузионного отжига с наложенной циклической нагрузкой Figure 3 — Distribution of silicon concentration (dashed lines 1, 2, 3) and microhardness of silicified layers (solid lines 4, 5, 6) on steel 10: 1, 4 — in the sample before processing; 2, 5 — in the sample after diffusion annealing with superimposed constant load; 3, 6 — in the sample after diffusion annealing with superimposed cyclic load

ни способствует интенсификации низкотемпературного (ниже температуры рекристаллизации) процесса ионно-плазменного азотирования конструкционной стали 40ХМФА. Сохраняющиеся деформационные дефекты кристаллического строения обеспечивают неаддитивное относительное повышение микротвердости азотированного слоя  $\Delta$ HV 0,05 = 90. В этом случае протекают лишь первичные стадии рекристаллизации до полигонизации включительно. Предположительно повышается концентрация азота в диффузионном слое.

Наличие циклической пластической деформации для высокотемпературного (выше температуры рекристаллизации) процесса диффузии кремния обеспечивает интенсификацию диффузионных процессов. Обнаружено увеличение толщины силицированного слоя с 218 до 297 мкм. Это обусловлено взаимодействием атомов кремния с дефектами кристаллической структуры (вакансий, дислокаций, границ блоков и зерен), плотность которых резко возрастает, а также циклическими высокотемпературными структурными превращениями в процессе динамической рекристаллизации. Циклическое нагружение с возникающими максимальными напряжениями выше предела текучести при отжиге приводит как к ускорению диффузии кремния в деформируемой стали, так и к диффузионному испарению его в окружающую среду.

### Список литературы

- Минкевич, А.Н. Химико-термическая обработка стали / А.Н. Минкевич. — М.: Машгиз, 1950. — 432 с.
- Пантелеенко, Ф.И. О классификации способов интенсификации процессов химико-термической обработки металлов и сплавов / Ф.И. Пантелеенко, Л.С. Ляхович, Б.С. Кухарев // Металлургия: респ. межвед. сб. / редкол.: В.С. Пащенко (гл. ред.) [и др.]. — Минск: Выш. шк., 1980. — Вып. 14. — С. 5–6.
- Чудина, О.В. Комбинированное поверхностное упрочнение стали (лазерное легирование + азотирование) / О.В. Чу-

дина // Металловедение и термическая обработка металлов. — 1994. — № 3. — С. 2–5.

- Баландин, Ю.А. Диффузионное многокомпонентное цинкование стали 40Х в виброкипящем слое / Ю.А. Баландин, А.С. Колпаков, Е.В. Жарков // Металловедение и термическая обработка металлов. — 2009. — № 1(643). — С. 46–49.
- Математическое моделирование и механизм укрупнения аустенитного зерна при высокотемпературном нагреве легированных конструкционных сталей / В.А. Кукареко [и др.] // Механика машин, механизмов и материалов. — 2019. — № 3(48). — С. 58–68.
- Структура технического титана, подвергнутого низкотемпературному ионному азотированию / В.А. Кукареко [и др.] // Механика машин, механизмов и материалов. — 2022. – № 1(58). — С. 48–55. — DOI: https://doi.org/10.46864/1995-0470-2022-1-58-48-55.
- Интенсификация процессов химико-термической обработки сталей / Л.Г. Петрова [и др.]; под ред. Л.Г. Петровой. — М.: МАДИ, 2019. — 160 с.
- Куксенова, Л.И. Влияние предварительной обработки на триботехнические характеристики конструкционных азотированных сталей / Л.И. Куксенова, М.С. Алексеева // Металловедение и термическая обработка металлов. — 2023. — № 1(811). — С. 34–42. — DOI: https://doi. org/10.30906/mitom.2023.1.34-42.
- Фарбер, В.М. Вклад диффузионных процессов в структурообразование при интенсивной холодной пластической деформации металлов / В.М. Фарбер // Металловедение и термическая обработка металлов. — 2002. — № 8. — С. 3–9.

- Алиев, А.А. Борирование из паст / А.А. Алиев. Л.Г. Ворошнин. Астрахань: АГТУ, 2006. 287 с.
- Скаков, Ю.А. Высокоэнергетическая холодная пластическая деформация, диффузия и механохимический синтез / Ю.А. Скаков // Металловедение и термическая обработка металлов. 2004. № 4(586). С. 3–12.
- Математическая модель твердофазной диффузии при периодической пластической деформации / Б.Б. Хина [и др.] // Металлофизика и новейшие технологии. — 2005. — Т. 27, № 5. — С. 609–623.
- Константинов, В.М. Ускоренная диффузия легирующих элементов в железе при химико-термической обработке порошков во вращающемся контейнере / В.М. Константинов // Докл. НАН Беларуси / гл. ред. М.В. Мясникович. — 2007. — Т. 51, № 2. — С. 103–107.
- 14. Бокштейн, С.З. Диффузия и структура металлов / С.З. Бокштейн. — М.: Металлургия, 1973. — 208 с.
- Ковалевская, Ж.Г. Структура и свойства поверхностных слоев и покрытий при модифицирующей ультразвуковой обработке: автореф. дис. ... д-ра техн. наук: 05.16.09 / Ж.Г. Ковалевская. — Томск, 2018. — 334 с.
- Высокоскоростная деформация металлов / В.И. Беляев [и др.]. — Минск: Наука и техника, 1976. — 224 с.
- Штремель, М.А. Прочность сплавов. Часть II. Деформация / М.А. Штремель. М.: МИСИС, 1997. 527 с.
- Константинов, В.М. Исследование процесса диффузионного легирования металлических порошков для защитных покрытий / В.М. Константинов, Ф.И. Пантелеенко, О.П. Штемпель // Вестн. Полоцкого гос. ун-та. Сер. В. Промышленность. Прикладные науки. 2002. Т. 1, № 2. С. 49–56.

### KONSTANTINOV Valerij M., D. Sc. in Eng., Prof.

Head of the Department "Materials Science in Mechanical Engineering"<sup>1</sup> E-mail: vm.konstantinov@bntu.by

LESHOK Vladislav A.

Ph. D. Student<sup>1</sup> E-mail: leshok.vlad@tut.by

### SHTEMPEL Oleg P.

Associate Professor of the Department of Motor Transport<sup>2</sup> E-mail: o.shtempel@psu.by

<sup>1</sup>Belarusian National Technical University, Minsk, Republic of Belarus <sup>2</sup>Euphrosyne Polotskaya State University of Polotsk, Novopolotsk, Republic of Belarus

Received 07 August 2023.

# ANALYSIS OF THE EFFECT OF PRELIMINARY AND CYCLIC PLASTIC DEFORMATION ON THE CHEMICAL-THERMAL TREATMENT OF STRUCTURAL STEELS

The subject of the study was thermodiffusion nitrided and silicified layers on steels obtained after plastic deformation. The influence of preliminary plastic deformation on the low-temperature nitriding process and cyclic plastic deformation on the high-temperature silicification process is studied. The results obtained are of interest for accelerating the production processes of chemical-thermal treatment of steels. It is established that preliminary surface plastic deformation contributes to the intensification of the process of ion-plasma nitriding of structural steel. The presence of high-temperature cyclic plastic deformation ensures the intensification of diffusion processes during the resorption of the diffusion silicified layer on structural steel.

*Keywords:* plastic deformation, intensification of chemical-thermal treatment, nitriding, silicification, structural steel

DOI: https://doi.org/10.46864/1995-0470-2024-1-66-37-42

#### References

- Minkevich A.N *Khimiko-termicheskaya obrabotka stali* [Chemical-thermal treatment of steels]. Moscow, Mashgiz Publ., 1950. 432 p. (in Russ.).
- Panteleenko F.I., Lyakhovich L.S., Kukharev B.S. O klassifikatsii sposobov intensifikatsii protsessov khimiko-termicheskoy obrabotki metallov i splavov [On the classification of methods for intensifying the processes of chemical-thermal treatment of metals and alloys]. *Metallurgiya*, 1980, iss. 14, pp. 5–6 (in Russ.).
- Chudina O.V. Kombinirovannoe poverkhnostnoe uprochnenie stali (lazernoe legirovanie + azotirovanie) [Combined surface hardening of steel (laser alloying + nitriding)]. Metallovedenie i termicheskaya obrabotka metallov, 2010, no. 5, p. 27 (in Russ.).
- Balandin Yu.A., Kolpakov A.S., Zharkov E.V. Diffuzionnoe mnogokomponentnoe tsinkovanie stali 40Kh v vibrokipyashchem sloe [Dry multicomponent galvanizing of steel 40Kh in vibrobubbling bed]. *Metallovedenie i termicheskaya obrabotka metallov*, 2009, no. 1(643), pp. 46–49 (in Russ.).
- Kukareko V.A., Gacuro V.M., Grigorchik A.N., Chichin A.N. Matematicheskoe modelirovanie i mekhanizm ukrupneniya austenitnogo zerna pri vysokotemperaturnom nagreve legirovannykh konstruktsionnykh staley [Mathematical modeling and mechanism of coarsening of austenitic grain at high-temperature heating of alloyed structural steels]. *Mechanics of machines, mechanisms and materials*, 2019, no. 3(48), pp. 58–68 (in Russ.).
- Kukareko V.A., Konstantinov V.M., Vereshchak N.A., Grigorchik A.N. Struktura tekhnicheskogo titana, podvergnutogo nizkotemperaturnomu ionnomu azotirovaniyu [Structure of technical titanium subjected to low-temperature ionic nitriding]. *Mechanics of machines, mechanisms and materials*, 2022, no. 1(58), pp. 48–55. DOI: https://doi.org/10.46864/1995-0470-2022-1-58-48-55 (in Russ.).
- Petrova L.G., et al. *Intensifikatsiya protsessov khimiko-termicheskoy obrabotki staley* [Intensification of the processes of chemical-thermal treatment of steels]. Moscow, MADI Publ., 2019. 160 p. (in Russ.).
- Kuksenova L.I., Alekseeva M.S. Vliyanie predvaritelnoy obrabotki na tribotekhnicheskie kharakteristiki konstruktsionnykh azotirovannykh staley [Effect of preliminary treatment on tribotechnical characteristics of nitrided structural steels]. *Metallovedenie i termicheskaya obrabotka metallov*, 2023, no. 1(811), pp. 34–42. DOI: https://doi.org/10.30906/mitom.2023.1.34-42 (in Russ.).
- Farber V.M. Vklad diffuzionnykh protsessov v strukturoobrazovanie pri intensivnoy kholodnoy plasticheskoy deformatsii

metallov [Contribution of diffusion processes to structure formation upon intensive cold deformation of metals]. *Metallovedenie i termicheskaya obrabotka metallov*, 2002, no. 8, pp. 3–9 (in Russ.).

- Aliev A.A., Voroshnin L.G. *Borirovanie iz past* [Borating from pastes]. Astrakhan, Astrakhanskiy gosudarstvennyy tekhnicheskiy universitet Publ., 2006. 287 p. (in Russ.).
- Skakov Yu.A. Vysokoenergeticheskaya plasticheskaya deformatsiya, diffuziya i mekhanokhimicheskiy sintez [High-energy cold plastic deformation, diffusion and mechanochemical synthesis]. *Metallovedenie i termicheskaya obrabotka metallov*, 2004, no. 4(586), pp. 3–12 (in Russ.).
- Khina B.B., Lovshenko G.F., Konstantinov V.M., Formanek B. Matematicheskaya model tverdofaznoy diffuzii pri periodicheskoy plasticheskoy deformatsii [Mathematical model of solid-phase diffusion under periodic plastic deformation]. *Metallophysics and advanced technologies*, 2005, vol. 27, no. 5, pp. 609–623 (in Russ.).
- Konstantinov V.M. Uskorennaya diffuziya legiruyushchikh elementov v zheleze pri khimiko-termicheskoy obrabotke poroshkov vo vrashchayushchemsya konteynere [Accelerated diffusion of alloying elements in iron during chemical-thermal treatment of powders in a rotating container]. *Doklady of the National Academy of Sciences of Belarus*, 2007, vol. 51, no. 2, pp. 103–107 (in Russ.).
- Bokshteyn S.Z. *Diffuziya i struktura metallov* [Diffusion and structure of metals]. Moscow, Metallurgiya Publ., 1973. 208 p. (in Russ.).
- Kovalevskaya Zh.G. Struktura i svoystva poverkhnostnykh sloev i pokrytiy pri modifitsiruyushchey ultrazvukovoy obrabotke. Diss. dokt. tekhn. nauk [Structure and properties of surface layers and coatings during modifying ultrasonic treatment. D. Sc. Thesis]. Tomsk, 2018. 334 p. (in Russ.).
- Belyaev V.I., et al. Vysokoskorosinaya deformatsiya metallov [High-speed deformation of metals]. Minsk, Nauka i tekhnika Publ., 1976. 224 p. (in Russ.).
- Shtremel M.A. Prochnost splavov. Chast II. Deformatsiya [Strength of alloys. Part II. Deformation]. Moscow, MISIS Publ., 1997. 527 p. (in Russ.).
- Konstantinov V.M., Panteleenko F.I., Shtempel O.P. Issledovanie protsessa diffuzionnogo legirovaniya metallicheskikh poroshkov dlya zashchitnykh pokrytiy [Investigation of the process of diffusion alloying of metal powders for protective coatings] Vestnik Polotskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya B. Promyshlennost. Prikladnye nauki, 2002, vol. 1, no. 2, pp. 49–56 (in Russ.).