

PHYSICS OF STRENGTH AND PLASTICITY

PACS numbers: 52.80.Hc, 62.20.fk, 62.20.me, 68.35.Dv, 68.35.Gy, 81.40.Np, 81.65.Lp

Исследование фреттинг-усталости стали 65Г после ионного азотирования в безводородных насыщающих средах

В. Г. Каплун, Т. В. Донченко, В. С. Курской, В. Г. Яковлев*

*Хмельницький національний університет,
ул. Інститутська, 11,
29016 Хмельницький, Україна*
**Волочиский машинобудівний завод АО «Мотор Сич»,
ул. Незалежності, 1,
31200 Волочиск, Хмельницька обл., Україна*

Приведены результаты исследований стали 65Г на фреттинг-усталость после нанесения диффузионных покрытий в плазме тлеющего разряда методом ионного азотирования в безводородных насыщающих средах. Показаны влияние параметров технологического процесса нанесения покрытий на долговечность образцов при фреттинг-усталости и возможность их оптимизации по критерию максимальной долговечности. Определён оптимальный режим ионного азотирования в безводородных средах по критерию максимальной долговечности стали 65Г при фреттинг-усталости. Установлено, что фреттинг-усталость стали 65Г после ионного азотирования по оптимальному режиму на порядок превышает соответствующее значение для неазотированной стали.

Ключевые слова: фреттинг-усталость, ионное азотирование, долговечность, безводородная среда, оксиазотирование.

Наведено результати досліджень сталі 65Г на фреттинг-втому після нане-

Corresponding author: Vitaliy Grygorovych Kaplun
E-mail: vgkaplun@gmail.ua

*Khmelnytskyi National University,
11 Instytutska Str., UA-29016 Khmelnytskyi, Ukraine*
**Volochyshk Machine-Building Plant of Motor Sich JSC,
1 Nezalezhnost Str., UA-31200 Volochyshk, Khmelnytskyi Reg., Ukraine*

Citation: V. G. Kaplun, T. V. Donchenko, V. S. Kurskoy, and V. G. Yakovlev, Study of Fretting-Fatigue of 65G Steel after Ion Nitriding in Anhydrous Saturating Media, *Metallofiz. Noveishie Tekhnol.*, 42, No. 5: 705–715 (2020) (in Russian), DOI: [10.15407/mfint.42.05.0705](https://doi.org/10.15407/mfint.42.05.0705).

сення дифузійних покриттів в плазмі жеврійного розряду методом йонного азотування в безводневих насичувальних середовищах. Показано вплив параметрів технологічного процесу нанесення покриттів на довговічність зразків при фретинг-втомі та можливість їх оптимізації за критерієм максимальної довговічності. Визначено оптимальний режим йонного азотування в безводневих середовищах за критерієм максимальної довговічності сталі 65Г при фретинг-втомі. Встановлено, що фретинг-втома сталі 65Г після йонного азотування за оптимальним режимом на порядок перевищує відповідне значення для неазотованої сталі.

Ключові слова: фретинг-втома, йонне азотування, довговічність, безводне середовище, оксиазотування.

The results of investigations of steel 65G fretting-fatigue after deposition of diffusion coatings in plasma of glow discharge by the method of the ion nitriding in hydrogen-free environments are presented. It is shown both an influence of parameters of deposition technological process on fretting-fatigue lifetime and a possibility of their optimization on the criterion of endurance maximum. The optimum condition of ion nitriding in hydrogen-free environments is determined according to criterion of maximal endurance of 65G steel under fretting-fatigue. As established, the fretting-fatigue of steel 65G after ion nitriding in the optimal mode is an order of magnitude higher than corresponding value for steel without nitriding.

Key words: fretting-fatigue, ion nitriding, endurance, hydrogen-free environment, oxinitriding.

(Получено 25 сентября 2019 г.; окончат. вариант — 21 января 2020 г.)

1. ВВЕДЕНИЕ

В технике большое количество деталей и узлов машин работают в тесном контакте (фреттинг), в условиях фреттинг-усталости и коррозионной фреттинг-усталости. Исследованием их долговечности в таких условиях посвящено много работ [1–16]. Такие процессы возникают в местах контакта деталей, в которых поверхности контакта совершают колебательные относительные перемещения с малой амплитудой под действием циклической нагрузки в различных средах. Поверхностные повреждения и микротрещины, появляющиеся при фреттинге, играют роль зародышей усталостных трещин, в результате роста которых усталостное разрушение происходит при таких нагрузках, которые в других условиях не вызывали бы разрушения [5–8, 15].

На долговечность конструктивных элементов при фреттинг-усталости влияет очень много факторов, зависящих от конструкции детали, свойств материала, нагрузки, среды и т.п., учёт которых имеет большое значение для эксплуатационных характеристик конструкции [5–9, 15]. При описании механизмов разрушения ис-

следователи процесса фреттинг-усталости выдвигают различные гипотезы, отдавая предпочтение тем или иным факторам, которые часто бывают противоречивыми и не дают объективного объяснения происходящим явлениям. Так, нет ясного представления о том, что важнее при фреттинг-усталостном разрушении — химический или механический факторы, и в какой момент какой из них является преобладающим. Авторы работ [6, 9, 12] считают, что на воздухе преобладающим является механический фактор, а другие [7, 14, 15] большое значение придают химическому фактору (влиянию среды). Авторы [9] считают, что влияние фреттинга на усталостную прочность проявляется только через образование поверхностных трещин непосредственно в процессе циклического контактного трения, а не через каверны и износ, коррозию или эрозию.

В настоящее время существует много методов повышения фреттинг-усталостной прочности конструкционных элементов, классификация которых приведена в работе [6] и которые можно разделить на две группы: конструкционные и технологические. Одним из перспективных направлений решения этой проблемы является модификация поверхности применением прогрессивных технологий: лазерного упрочнения [3], электроискрового легирования [4], методов химико-термической обработки [5, 14, 15], печного азотирования [7], ионного азотирования в безводородных средах [2, 16]. Это позволяет значительно увеличить долговечность конструкционных элементов при фреттинг-усталости в различных средах. Поэтому продолжение исследований в данном направлении представляет научный и практический интерес.

2. МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

Нами проводились сравнительные испытания цилиндрических образцов из стали 65Г с диффузионными покрытиями с различными физико-механическими и трибологическими характеристиками. Исследовались образцы с нитридными покрытиями, полученными в плазме тлеющего разряда в безводородных насыщающих средах по различным режимам, а также образцы с комбинированными покрытиями, в которых сверху на нитридное покрытие наносился оксидный слой ионным методом.

Задачами исследования были: провести сравнительную оценку долговечности образцов из стали 65Г в исходном состоянии без химико-термической обработки и образцов с диффузионными покрытиями с различными физико-механическими свойствами, полученными методами ионного азотирования и ионного оксиазотирования; определить влияние технологических режимов ионного азотирования и последующего оксидирования на фреттинг-усталость; разработать рекомендации по повышению долговечности кон-

струкционных сталей, работающих в условиях фреттинг-усталости при нагружении изгибом.

Испытания проводились на базе типовой машины УКИ-10М, предназначенной для испытаний на усталость при консольном изгибе, с применением специального устройства (рис. 1), в котором испытываемый образец 1 закреплялся конической частью в контрообразец 2 гайками. В коническом соединении создавалось определенное натяжение с помощью динамометрического ключа. Контрообразец 2 соединялся с держателем 3, который крепился в цанговом патроне установки УКИ-10М и совершал вращательное движение. Нагрузочное устройство 4 создавало напряжения изгиба в образце с максимальным значением в точке А, которые вызывали микроперемещения в коническом соединении. При вращении образца и воздействии Q в коническом соединении материал испытывает фреттинг-усталость.

В качестве критерия оценки фреттинг-усталости служило число

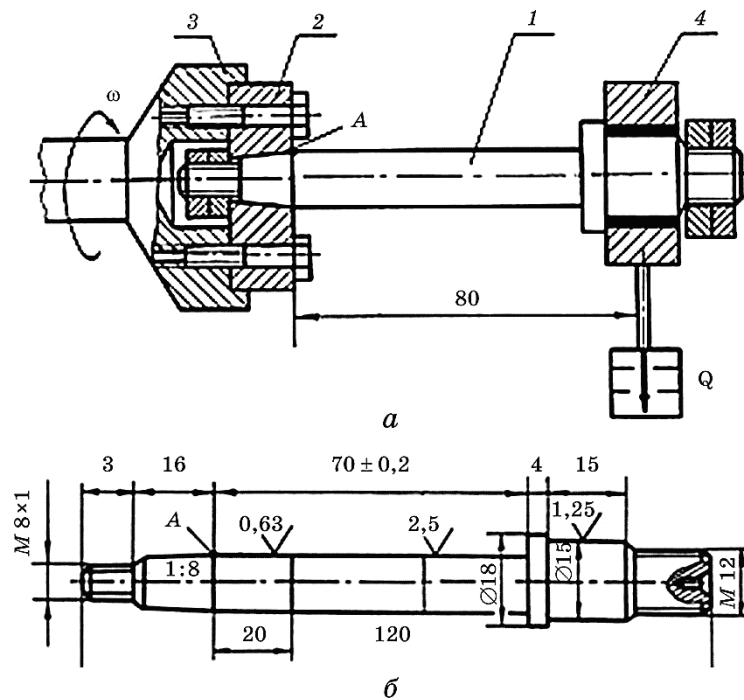


Рис. 1. Схемы установки и образца для испытаний на фреттинг-усталость: 1 — испытываемый образец, 2 — контрообразец, 3 — держатель, 4 — нагрузочное устройство.

Fig. 1. Schemes of setup and sample for fretting-fatigue testing: 1—tested sample, 2—counter-sample, 3—holder, 4—load device.

циклов нагрузки до разрушения образца. За базовое число циклов нагрузки принято число циклов нагрузки неазотированного образца из стали 65Г, установленного в контрообразец 2 из закалённой стали 45 с твёрдостью HRC 43.

Испытания проводились на воздухе при частоте вращения образца 6000 мин^{-1} , нагрузке $Q = 400 \text{ Н}$, крутящем моменте затяжки гайки крепления образца $25 \text{ Н}\cdot\text{м}$, максимальном напряжении изгиба 210 МПа . Биение образца в месте приложения нагрузки Q составляло $0,05\text{--}0,15 \text{ мм}$. С целью сокращения количества экспериментов и определения влияния технологических параметров процесса диффузионного упрочнения поверхности применялся четырехфакторный план Хартли [17], в котором технологические параметры изменялись в следующих интервалах: температура $T = 480\text{--}600^\circ\text{C}$, давление $P = 80\text{--}450 \text{ Па}$, время насыщения $\tau = 20\text{--}240 \text{ мин}$, содержание Ar в смеси с азотом — $0\text{--}76 \text{ об.}\%$.

Математическое описание исследуемого процесса фреттинг-усталости согласно плану Хартли выражается регрессионной моделью в виде полного квадратичного полинома

$$\varphi(x) = \beta_0 + \sum_{i=1}^n \beta_i x_i + \sum_{i=1}^n \beta_{ii} x_i^2 + \sum_{i=1}^n \sum_{j=i+1}^n \beta_{ij} x_i x_j, \quad (1)$$

где $\varphi(x)$ — функция отклика, $\beta_0, \beta_i, \beta_{ii}, \beta_{ij}$ — коэффициенты уравнения регрессии, x_i, x_j — независимые переменные факторы.

Методами металлографии и дюротрии определялись микроструктура, толщина и микротвёрдость по толщине азотированного слоя с использованием микроскопов МИМ-9 и ПМТ-3. Фазовый состав на поверхности азотированных слоёв определяли с использованием ДРОН-3М с применением стандартных методик. Остаточные напряжения сжатия в азотированных слоях определялись по методике [19].

3. РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Исследованиями образцов из стали 65Г установлено (табл. 1), что после ионного азотирования физико-механические характеристики азотированных слоёв изменялись в зависимости от режимов технологического процесса и находились в пределах: толщина азотированного слоя h от 66 до 316 мкм, микротвёрдость поверхности H_{100} от 4130 до 7106 МПа. Остаточные напряжения σ_n на поверхности изменялись от 208 до 478 МПа. При этом фазовый состав на поверхности образцов также существенно изменялся — от наличия в нитридных слоях всех трёх фаз ($\epsilon, \gamma', \alpha$) в их различном процентном соотношении, до преимущественного наличия α -фазы (зоны внутреннего азотирования). На рисунке 2 показана дифрактограмма образца из стали 65Г после ионного азотирования в тлеющем разряде по

режиму 1 (табл. 1). Обнаружены рефлексы ε -фазы $\text{Fe}_{2-3}(\text{N})$, $\text{Fe}_{2-3}(\text{N}, \text{C})$, γ' -фазы Fe_4N , $\text{Fe}_4(\text{N}, \text{C})$, а также фазы, состоящие из нитридов и карбонитридов хрома (CrN , $\text{Cr}(\text{N}, \text{C})$, Cr_2N , $\text{Cr}_2(\text{N}, \text{C})$).

Легирующие элементы такие как Cr, Mn растворяясь в γ' -фазе уменьшают в ней содержание азота и толщину азотированного слоя.

На рисунке 3 представлены микроструктура и эпюры остаточных напряжений в стали 65Г после ионного азотирования. Из рисунка видно, что в поверхностном слое образцов после ионного азотирования возникают остаточные напряжения сжатия, величина которых зависит от параметров технологического процесса и достигает 440 МПа при режиме 2 ионного азотирования (рис. 3, а). Максимальное значение остаточных напряжений возникает на поверхности диффузионного слоя в нитридной зоне (рис. 3, б) и их величина уменьшается по глубине по экспоненциальному закону. Величиной остаточных напряжений можно управлять в значительных пределах, что очень важно для практики.

Для четырёхфакторного эксперимента второго порядка, соответствующего нашим исследованиям (табл. 2), получено уравнение (2) зависимости фреттинг-усталости от технологических параметров

ТАБЛИЦА 1. Зависимости толщины h , микротвёрдости H_{100} и остаточных напряжений σ_n на поверхности азотированного слоя от технологических режимов ионного азотирования стали 65Г.

TABLE 1. Dependences of thickness h , microhardness H_{100} , and residual stresses σ_n for the surface of nitrated layer on the technological regimes of ion nitriding of 65G steel.

№ режима азотирования	Значения факторов режима азотирования				h , мкм	H_{100} , МПа	σ_n , МПа
	T , °С	P , Па	τ , мин	A_r , об. %			
1	570	320	185	57	341	6362	391
2	510	320	185	57	246	5964	351
3	570	160	185	19	294	7106	466
4	510	160	185	19	195	5918	347
5	570	320	75	19	237	6753	430
6	510	320	75	19	123	5981	353
7	570	160	75	57	151	6759	431
8	510	160	75	57	97	5717	327
9	480	240	130	38	129	4130	208
10	600	240	130	38	305	7230	478
11	540	80	130	38	186	7380	393
12	540	400	130	38	272	5860	341
13	540	240	20	38	66	6625	418
14	540	240	240	38	316	5995	355
15	540	240	130	0	230	6050	360
16	540	240	130	76	190	5890	344
17	540	240	130	38	241	6800	335

процесса ионного азотирования:

$$L_g N = 7,14 - 0,786x_1 + 1,278x_2 + 1,434x_3 - 0,278x_4 - 2,466x_1^2 - \\ - 1,26x_2^2 - 2,16x_3^2 - 1,482x_4^2 + 1,872x_1x_2 + 1,068x_1x_3 - \\ - 0,451x_1x_4 - 0,418x_2x_3 - 0,169x_2x_4 + 1,254x_3x_4, \quad (2)$$

где N — долговечность в циклах при фреттинг-усталости, x_1, x_2, x_3, x_4 — безразмерные коэффициенты, зависящие от технологических факторов процесса ионного азотирования, соответственно T в °С, P , τ и состава среды.

В таблице 2 приведены результаты испытаний на фреттинг-усталость образцов, азотированных в безводородных насыщающих средах по различным режимам, из которых видно, что ионное азотирование позволяет изменять долговечность образцов в широких пределах (от $1,7 \cdot 10^6$ до $20,5 \cdot 10^6$ циклов нагрузки) и более чем на порядок повысить выносливость образцов (при азотировании по оптимальному режиму) по сравнению с неазотированными образцами.

Это объясняется следующим: во-первых, положительным влиянием остаточных напряжений сжатия, возникающих в поверхностных слоях после ионного азотирования; во-вторых, повышенными физико-механическими и антифрикционными характеристиками нитридных соединений в зоне фреттинга.

Наличие остаточных напряжений сжатия меняет картину напряжённого состояния при изгибе в опасных сечениях конструктивных элементов. Суммарные напряжения в растянутых слоях

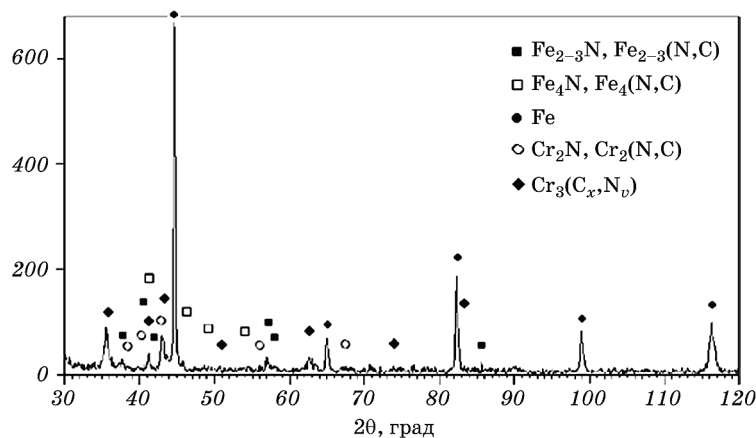


Рис. 2. Диффрактограмма образца из стали 65Г после ионного азотирования в тлеющем разряде по режиму 1 (табл. 1).

Fig. 2. Diffractogram of 65G steel sample after ion nitriding in glow discharge of mode 1 (table 1).

уменьшаются, а в сжатых увеличиваются. Учитывая тот факт, что в сталях предел прочности на сжатие значительно превышает предел прочности на растяжение, такое перераспределение напряжений является благоприятным для увеличения несущей способности и долговечности конструктивных элементов, и максимальный эффект достигается при оптимальном значении остаточных напряжений сжатия.

На рисунке 4 приведены графики $\lg N = f(T, P, \tau, \text{Ar об.}\%)$, из которых видно, что функция имеет экстремальный характер с явно выраженными максимумами для всех технологических параметров ионного азотирования. Это свидетельствует о возможности оптимизации процесса фреттинг-усталости по критерию долговечности. Исследование уравнения регрессии позволило установить, что для условий эксперимента оптимальным режимом азотирования стали 65Г является: $T = 540^\circ\text{C}$, $P = 400$ Па, $\tau = 130$ мин, среда 62 об.% $\text{N}_2 + 38$ об.% Ar. При данном режиме азотирования поверхностный слой имел толщину $h = 250$ мкм, микротвёрдость поверхности $H_{100} = 7150$ МПа, максимальные остаточные напряжения $\sigma_0 = 340$ МПа и фазовый состав поверхностного слоя 20% $\epsilon + 55\%$ $\gamma' + 25\%$ α (рис. 3).

По аналогичной методике испытаний проводились исследования фреттинг-усталости образцов из стали 65Г с комбинированными

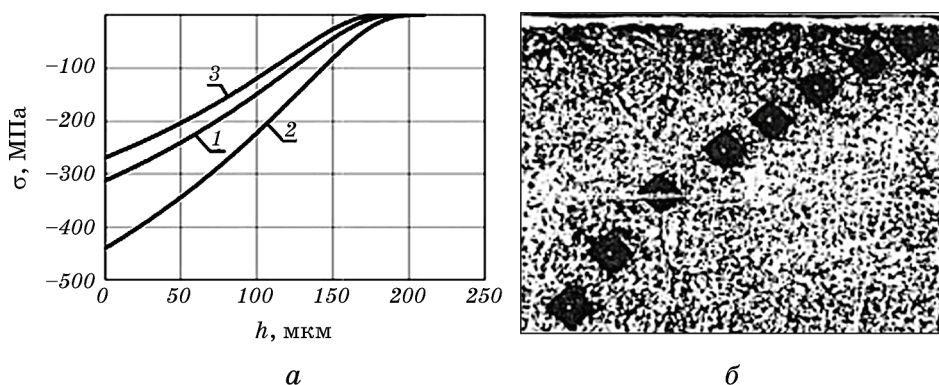


Рис. 3. Эпюры (а) распределения остаточных напряжений в стали 65Г по глубине азотированного слоя в зависимости от технологических режимов азотирования (1 — 100% N_2 , 2 — 25% Ar + 75% N_2 , 3 — 50% Ar + 50% N_2) при постоянных значениях других факторов ($T = 560^\circ\text{C}$, $P = 265$ Па, $\tau = 180$ мин); микроструктура (б) стали 65Г после ионного азотирования по режиму 2.

Fig. 3. Plots (a) of the distribution of residual stresses in 65G steel over the depth of the nitrided layer depending on the technological nitriding regimes (1—100% N_2 , 2—25% Ar + 75% N_2 , 3—50% Ar + 50% N_2) at constant values of other factors ($T = 560^\circ\text{C}$, $P = 265$ Па, $\tau = 180$ min); microstructure (б) of 65G steel after ion nitriding at regime 2.

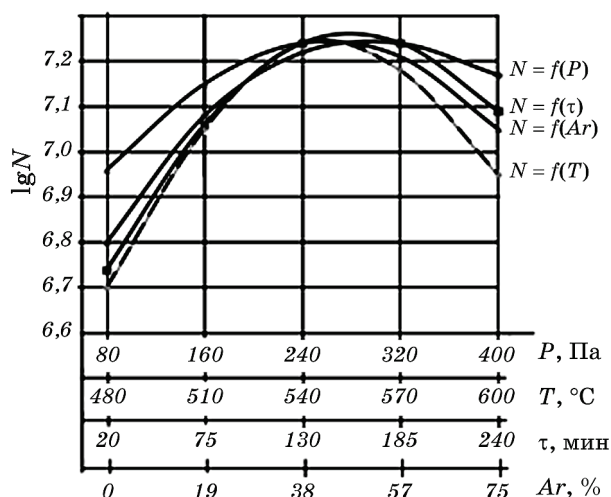


Рис. 4. Влияние режимов ионного азотирования на фреттинг-усталость стали 65Г (испытания на воздухе при $\sigma_u = 210$ МПа).

Fig. 4. The effect of ion nitriding regimes on fretting-fatigue of 65G steel (tests in air at $\sigma_u = 210$ MPa).

диффузионными покрытиями. Комбинированные диффузионные покрытия состояли из нижнего азотированного слоя, полученного по приведенному выше оптимальному режиму, и верхнего оксидного слоя толщиной 2 мкм, полученного методом ионного оксиазотирования. Фазовый состав оксидного слоя имел 90% магнетита и 10% гематита.

Испытания показали, что долговечность образцов с комбинированным покрытием на 15–20% выше по сравнению с азотированными образцами. Это объясняется тем, что оксидный слой определенного фазового состава значительно уменьшает коэффициент трения в зоне фреттинга [18] и уменьшает контактные напряжения в опасной точке образца за счёт меньшего модуля упругости оксидного слоя по сравнению с нитридным слоем. В агрессивных средах оксидный слой выполняет функцию экранирования от действия поверхностно-активных веществ при адсорбционной усталости [12]. Совокупное действие этих факторов приводит к повышению долговечности образцов при фреттинг-усталости.

4. ВЫВОДЫ

Проведенные исследования показали, что нанесение диффузионных покрытий методом ионного азотирования в безводородных насыщающих средах существенно влияет на физико-механические

характеристики, фазовый состав и остаточные напряжения, изменяя их в широких пределах, что позволяет оптимизировать процесс упрочнения поверхности по критериям максимальной долговечности. В результате оптимизации технологических режимов ионного азотирования стали 65Г в безводородных насыщающих средах её долговечность при испытаниях на фреттинг-усталость повысилась на порядок по сравнению с незаазотированной сталью. Применение ионного оксиазотирования повышает фреттингостойкость стали 65Г в коррозионно-активных средах на 20% по сравнению с ионным азотированием.

ЦИТИРОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА

1. С. Г. Костогриз, Ю. І. Шалапко, А. Л. Ганзюк, *Вісник технологічного університету Поділля*, № 4, ч. 2: 80 (1998).
2. П. В. Каплун, *Контактна витривалість та зносостійкість сталей з покриттями при терті кочення* (Хмельницький: ХНУ: 2018).
3. Y. I. Shalapko and V. G. Kaplun, *Appl. Mech. Eng.*, 7: 425 (2002).
4. Ю. І. Шалапко, В. Г. Каплун, В. А. Гончар, *Вестник двигателестроения*, № 1: 135 (2002).
5. В. В. Шевеля, Г. С. Калда, *Фреттинг-усталость металлов* (Хмельницький: Поділля: 1998).
6. Н. Л. Голего, А. Я. Алябьев, В. В. Шевеля, *Фреттинг-коррозия металлов* (Київ: Техніка: 1974).
7. В. И. Похмурский, *Коррозионно-усталостная прочность сталей и методы ее повышения* (Київ: Наук. думка: 1974).
8. Р. Б. Уотерхауз, *Фреттинг-коррозия* (Ленинград: Машиностроение: 1976).
9. Г. Н. Филимонов, Л. Т. Балацкий, *Фреттинг в соединениях судовых деталей* (Ленинград: Судостроение: 1973).
10. А. Н. Петухов, Б. Ф. Балашов, *Вестник машиностроения*, № 6: 17 (1974).
11. В. И. Похмурский, *Коррозионная усталость металлов* (Москва: Металлургия: 1985).
12. Н. Л. Голего, В. П. Оноприенко, М. Н. Рожков, А. Л. Гайдаренко, *Трение и износ*, 4, № 4: 581(1983).
13. Н. С. Кулагин, А. И. Духота, В. Л. Свечников, *Перспективные методы восстановления деталей и узлов авиационной техники*, 1989: 24 (1989).
14. А. И. Духота, М. В. Киндрачук, В. Ф. Лабунец, *Праці 13-го міжн. колокви. «Механічна втома металів (МВМ-2006)» (25–28 вер. 2006 р., Тернопіль)* (Тернопіль: ТДТУ: 2006), с. 243.
15. В. І. Похмурський, М. С. Хома, *Корозійна втома металів і сплавів* (Львів: СПОЛОМ: 2008).
16. В. Г. Каплун, П. В. Каплун, *Ионное азотирование в безводородных средах* (Хмельницький: ХНУ: 2015).
17. Г. И. Красовский, Г. Ф. Филаретов, *Планирование эксперимента* (Минск: БГУ: 1982).
18. Б. И. Костецкий, И. Г. Носовский, А. К. Караулов и др. *Поверхностная прочность металлов при трении* (Ред. Б. И. Костецкого) (Київ: Техніка: 1976).

19. P. V. Kaplun and B. A. Lyashenko, *Strength Mater.*, **48**: 777 (2016).

REFERENCES

1. S. H. Kostohryz, Yu. I. Shalapko, and A. L. Hanzhuk, *Visnyk Tekhnolohichnoho Universytetu Podillya*, No. 4, Ch. 2: 80 (1998) (in Ukrainian).
2. P. V. Kaplun, *Kontaktna Vytryvalist ta Znosostiykist Staley z Pokryttyamy pry Terti Kochennya* (Khmelnyskyi: KhNU : 2018) (in Ukrainian).
3. Y. I. Shalapko and V. G. Kaplun, *Appl. Mechan. Eng.*, **7**: 425 (2002).
4. Yu. Y. Shalapko, V. H. Kaplun, and V. A. Honchar, *Vestnyk Dvyhatelestroeniya*, No. 1: 135 (2002) (in Ukrainian).
5. V. V. Shevelya and H. S. Kalda, *Fretting-Ustalost Metallov* (Khmelnyskyi: Podillya: 1998) (in Russian).
6. N. L. Holeho, A. Ya. Alyabev, and V. V. Shevelya, *Fretting-Korroziya Metallov* (Kyiv: Tekhnika: 1974) (in Russian).
7. V. I. Pokhmurskiy, *Korrozionno-Ustalostnaya Prochnost Staley i Metody Ee Povysheniya* (Kyiv: Naukova Dumka: 1974) (in Russian).
8. R. B. Uoterkhauz, *Fretting-Korroziya* (Leningrad: Mashynostroenie: 1976) (in Russian).
9. G. N. Filimonov and L. T. Balatskiy, *Fretting v Soedineniyakh Sudovykh Detaley* (Leningrad: Sudostroenie: 1973) (in Russian).
10. A. N. Petukhov and B. F. Balashov, *Vestnik Mashinostroeniya*, No. 6: 17 (1974) (in Russian).
11. V. I. Pokhmurskiy, *Korrozionnaya Ustalost Metallov* (Moscow: Metallurgiya: 1985) (in Russian).
12. N. L. Golego, V. P. Onoprienko, M. N. Rozhkov, and A. L. Gaydarenko, *Trenie i Iznos*, **4**, No. 4: 581 (1983) (in Russian).
13. N. S. Kulagin, A. I. Dukhota, and V. L. Svechnikov, *Perspektivnye Metody Vosstanovleniya Detaley i Uzlov Aviatsionnoy Tekhniki*, **1989**: 24 (in Russian).
14. A. I. Dukhota, M. V. Kindrachuk, and V. F. Labunets, *Proc. of 13-th Int. Colloq. 'Mekhanichna Vtoma Metaliv (MVM-2006)' (Sept. 25–28, 2006, Ternopil)* (Ternopil: TDTU: 2006), p. 243 (in Russian).
15. V. I. Pokhmurskiy and M. S. Khoma, *Koroziyna Vtoma Metaliv i Splaviv* (Lviv: SPOLOM: 2008) (in Ukrainian).
16. V. G. Kaplun and P. V. Kaplun, *Ionnoe Azotirovanie v Bezzodorodnykh Sredakh* (Khmelnyskyi: KhNU: 2015) (in Russian).
17. G. I. Krasovskiy, G. F. Filaretov, *Planirovanie Eksperimenta* (Minsk: BHU: 1982) (in Russian).
18. B. I. Kostetskiy, I. G. Nosovskiy, A. K. Karaulov *et al.*, *Poverkhnostnaya Prochnost Metallov pri Trenii* (Ed. B. Y. Kostetskiy) (Kyiv: Tekhnika: 1976) (in Russian).
19. P. V. Kaplun and B. A. Lyashenko, *Strength Mater.*, **48**: 777 (2016).