ՀԱՅԱՍՏԱՆԻ ԳԻՏՈՒԹՅՈՒՆՆԵՐԻ ԱԶԳԱՅԻՆ ԱԿԱԴԵՄԻԱՅԻ ՏԵՂԵԿԱԳԻՐ
ИЗВЕСТИЯ НАЦИОНАЛЬНОЙ АКАДЕМИИ НАУК АРМЕНИИ

Մեխանիկա 79, №3, 2026 Механика
УДК 539.3 DOI: 10.54503/0002-3051-2026.79.3-72

ОЦЕНКА УСТАЛОСТНОЙ ПРОЧНОСТИ ОТВЕТСТВЕННЫХ КОНСТРУКЦИОННЫХ ЭЛЕМЕНТОВ МЕТОДОМ НОМОГРАФИИ

Торосян М.С., Стакян М.Г.

Ключевые слова: конструкционные элементы, поверхностное пластическое деформирование, математическая модель упрочнения, номограмма.

Torosyan M.S., Stakyan M.G.

Assessment of Fatigue Strength of Responsible Structural Elements Using the Nomographic Method

Key words: structural elements, surface plastic deformation, mathematical model of strengthening, nomogram.

A general mathematical model of the reinforcement process for structural elements is presented as a multiparameter function, which is replaced by a system of parametric equations for practical application. A principle of prioritizing one of the equation parameters as an argument, stemming from practical requirements, is proposed. It is shown that increasing the fatigue limit of elements due to surface plastic deformation significantly neutralizes the combined effects of scale effects and stress concentration. Deformed layer depth and microhardness were measured on specimens, and new functional relationships between these indicators and surface plastic deformation parameters were identified. A database has been developed that allows for the formation of systems of parametric equations to solve a specific application problem and to obtain correlated and optimal values for the required data. Using the resulting functional relationships, nomograms were compiled to determine the correlation and complex values of these indicators and parameters.

Թորոսյան Մ.Ս., Ստակյան Մ.Գ.

Կոնստրուկցիաների պատասխանատու տարրերի հոգնածային ամրության գնահատումը նոմոգրաֆիական մեթոդով

Հիմնաբառեր՝ կոնստրուկցիոն էլեմենտ, մակերևութային պլաստիկ դեֆորմացում, ամրացման մաթեմատիկական մոդել, նոմոգրամ:

Ներկայացված է կոնստրուկցիոն էլեմենտների ամրացման գործընթացի ընդհանուր մաթեմատիկական մոդելը բազմապարամետրական ֆունկցիայի տեսքով, որը գործնական կիրառման համար փոխարինված է պարամետրական հավասարումների համակարգով: Առաջադրված է հավասարումների պարամետրերից մեկի, որպես արգումենտի, առաջնայնության սկզբունքը, որը բխում է գործառնական պահանջներից: Ցույց է տրված, որ մակերևութային պլաստիկ դեֆորմացման շնորհիվ էլեմենտների դիմացկունության սահմանի աճը զգալիորեն ազդազերծում է մասշտաբային էֆեկտի և լարումների կուտակման համալիր ազդեցությունը: Փորձանմուշների վրա կատարվել են դեֆորմացված շերտի խորության և միկրոկարծրությունների չափումներ և բացահայտվել են նոր ֆունկցիոնալ կապեր նշված ցուցանիշների և մակերևութային պլաստիկ դեֆորմացիայի պարամետրերի միջև: Մշակվել է տվյալների բազա, որի շնորհիվ կարելի է որոշակի կիրառական խնդրի լուծման նպատակով ձևավորել պարամետրական հավասարումների համակարգեր և ստանալ անհրաժեշտ տվյալների փոխկապակցված և օպտիմալ արժեքներ: Օգտագործելով ստացված ֆունկցիոնալ կապերը՝ ձևակերպվել են նոմոգրամներ նշված ցուցանիշների և պարամետրերի փոխկապակցված և համալիր արժեքների որոշման համար:

Представлена общая математическая модель процесса армирования конструктивных элементов в виде многопараметрической функции, которая для практического применения заменена системой параметрических уравнений. Предложен принцип приоритета одного из параметров уравнений в качестве аргумента, вытекающий из практичных требований. Показано, что увеличение предела выносливости элементов вследствие поверхностной пластической деформации значительно нейтрализует комплексное воздействие масштабного эффекта и концентрации напряжений. На образцах были проведены измерения глубины деформированного слоя и микротвердости, выявлены новые функциональные зависимости между указанными показателями и параметрами поверхностной пластической деформации. Разработана база данных, благодаря которой можно формировать системы параметрических уравнений для решения определенной прикладной задачи и получать коррелированные и оптимальные значения необходимых данных. Используя полученные функциональные зависимости, были составлены номограммы для определения корреляционных и комплексных значений указанных показателей и параметров.

Введение Тенденция роста выпуска машин различного назначения, в первую очередь, предполагает совершенствование и разработку новых технологических процессов, обеспечивающих повышение производительности, рабочих скоростей и грузоподъемности с одновременным снижением их материалоемкости. Одним из направлений достижения указанной цели является применение в машиностроительном производстве метода поверхностного пластического деформирования (ППД) рабочих поверхностей деталей, наиболее подверженных разрушению из-за комплексного воздействия повреждающих явлений (усталость, старение, износ и пр.). Инновационные разработки в этой области с применением физических методов воздействия наряду с их простотой и доступностью повышают эффективность указанной технологии, не требуя при этом специального и сложного оборудования [1,2,3].

Учитывая сравнительно широкий спектр воздействия различных факторов, для повышения несущей способности ответственных деталей следует классифицировать и уточнить вид упрочняющей технологии, конструкционные материалы, группы деталей машин, режимы их нагружения и пр., что позволит выбрать необходимые данные из ранее выполненных исследований для оптимизации решений и их применения к конкретному классу машин. В справочной литературе для среднеуглеродистых и низколегированных сталей, широко применяемых в машиностроении, подробно представлены табличные и графические данные для определения необходимых параметров. Но, несмотря на информативность и практическое применение накопленных данных, они не классифицированы по комплексному принципу. Кроме того, применена дифференциальная оценка каждого из действующих факторов, отсутствуют их взаимосвязь и степень взаимодействия. Это препятствует интегральному подходу и выбору оптимальных параметров, обеспечивающих максимальное повышение сопротивления усталости элементов конструкции и, как следствие, не создает условий для снижения их материалоемкости [4,5].

Число действующих факторов на прочность деталей значительно, а варианты их сочетаний весьма разнообразны, что обусловлено конструктивными, технологическими особенностями и условиями их работы. Поэтому при классификации и группировке факторов необходим выбор основного из них, оказывающего превалирующее влияние. Это возможно с учетом регрессионных связей между показателями факторов, моделирующих исследуемый процесс и позволяющих принимать решения по совершенствованию конструкции отдельных элементов и

повышению качества выпускаемой машины, что является важной задачей совершенствования машиностроительного производства [6,7,8].

Целью исследования является - разработка методики повышения несущей способности ответственных деталей с учетом комплексных конструкторско-технологических и эксплуатационных мероприятий и применения технологии ППД. Для достижения поставленной цели сформулированы следующие задачи исследования:

1. Выполнить анализ методов ППД, классифицировать данные для деталей вращательного типа по указанным мероприятиям и выбрать наиболее простой метод ППД.

2. На основе комплексного исследования разработать многопараметрическую функциональную связь между технологическими параметрами ППД и материаловедческими, конструктивными, микрогеометрическими и усталостными показателями деталей, а также создать обобщенную математическую модель ППД.

3. Используя семейства взаимосвязанных функций, построить номограммы [9], позволяющие при различном числе и сочетаниях рассмотренных величин определить комплекс оптимальных параметров, обеспечивающих надежность работы машины.

Метод исследования Теоретическая часть исследования основана на положениях конструкционной механики, технологии машиностроения и математической статистики для выявления регрессионных связей и разработки математической модели ППД с использованием стандартных программных средств. Использован метод системного анализа процессов и групп опытных данных с целью получения многопараметрических функциональных связей и построения номограмм для определения комплекса взаимосвязанных оптимальных параметров. Проведен анализ исследований, посвященных вопросам ППД. Изучены: принцип, виды технологических методов упрочнения деталей, инструментарий и механизмы формирования физико-механического состояния упрочненных поверхностных слоев, а также экспериментальные способы измерения показателей этих слоев.

Для деталей типа тел вращения (оси, валы, соединения “вал-ступица” и др.) выбран наиболее простой и доступный метод поверхностного упрочнения – деформирующая обкатка поверхностей шариковым (роликовым) инструментом. Примерно 75% отказов машин и оборудования, в основном, зависит от усталостных и коррозионных явлений, которые имеют место в работе транспортных средств, с/х машин и оборудования, поэтому параллельно с совершенствованием упрочняющих технологий также необходимо уточнить методы количественной оценки работоспособности упрочненных деталей. Учитывая большое количество одновременно действующих факторов при ППД, а также разнообразие их сочетаний и доминантность одного из них, продиктованную условиями решения конструкторско–технологических и эксплуатационных задач, необходимо использовать метод системного анализа для получения оптимальных значений параметров, который в ранее проведенных исследованиях ППД не применялся [10].

Результаты исследования Из-за отсутствия интегральной оценки процесса упрочнения, в работе выполнена классификация указанных исследований с комплексной оценкой факторов при их различном количестве и сочетаниях. На основе системного анализа данных представлена математическая модель процесса упрочнения в виде общей многопараметрической функциональной связи [11,12,13]

$$\Phi_1\left[\left(\sigma_B,\sigma_R,HB\right),\left(C_{(v)},m_{(v)},N_{G(v)},d,\alpha_\sigma\right),\left(F,V,S,t,HV,\Delta h\right)\right]=0, \quad (1)$$

которую необходимо заменить системой параметрических уравнений

$$\Delta h=\varphi_1\left(F,S\right),\ HV=\varphi_2\left(\Delta h\right),\ \bar{\sigma}_{R(v)}=\varphi_3\left(\Delta h,\bar{\alpha}_\sigma,d\right),$$

$$d=\varphi_4\left(\bar{\sigma}_{R(v)},\bar{\alpha}_\sigma,\Delta h\right),\ \bar{m}_{(v)}=\varphi_5\left(\bar{\sigma}_{R(v)}\right),\ \bar{C}_{(v)}=\varphi_6\left(\bar{m}_{(v)}\right), \quad (2)$$

$$\bar{m}_{(v)}=\varphi_7\left(HV_{max}\right),\ \bar{m}_{(v)}=\varphi_8\left(\Delta h\right),\bar{\sigma}_{R(v)}=\varphi_9\left(lg\bar{N}_{G(v)}\right),\ lg\bar{N}_{G(v)}=\varphi_{10}\left(\Delta h\right),$$

где представлены предварительные характеристики образцов (σ_B,σ_T, *HB*), показатели медианных кривых усталости ($\bar{C}_{(v)}$, $\bar{m}_{(v)}$, $\bar{\sigma}_{R(v)}$, $\bar{N}_{G(v)}$), геометрических параметров и форм (d, $\bar{\alpha}_\sigma$), параметров процесса упрочнения (F,V,S) и показателей состояния упрочненных поверхностных слоев ($HV,HV_{max},\Delta h$). Уравнения системы (2) также являются многопараметрическими функциями, но они предназначены для решения частных задач (конструкторских, технологических или эксплуатационных). Их особым свойством является классификация параметров данной функции на доминантные (в качестве аргумента) и вторичные, исходя из целей, предъявляемых к конструкции машины, и характера действующих факторов.

Выполнена количественная оценка влияния ППД ($\Delta h_{1,2,3,4}=0;0.05;0.10;0.15$ *мм*) на показатели усталостной прочности и долговечности $\bar{\sigma}_{R(v)}$ и $\bar{N}_{G(v)}$ для образцов из стали *40Х* с диаметрами $d_{1,2,3,4}=7,5;10;15;20$ *мм* – гладких ($\bar{\alpha}_{\sigma1}=1,0$) и с концентраторами напряжений ($\bar{\alpha}_{\sigma2,3,4}=1,25;1,75;2,75$).

Из системы (2) рассмотрены функции $\bar{m}_{(v)}=\varphi_5\left(\bar{\sigma}_{R(v)}\right)$, $\bar{C}_{(v)}=\varphi_6\left(\bar{m}_{(v)}\right)$ и $\bar{\sigma}_{R(v)}=\varphi_9\left(lg\bar{N}_{G(v)}\right)$, представляющие интерес для практических расчетов. Графический анализ данных показывает наличие прямолинейной связи между показателями (коэф. детерминации: $R^2=0.91\cdots0.99$). Отмечается также плотное распределение функций, что позволяет получить обобщенные регрессионные связи для комплексной оценки ППД от действия нескольких групп параметров.

Учитывая, что физико–механическое состояние поверхностных слоев после ППД окончательно формирует циклическую прочность и долговечность деталей, выполнены массовые измерения величин HV,R_a,R_z,R_{max} на наклонных полированных площадках 15 упрочненных образцов ($D=35.5$ *мм,* $\alpha=2^0 20'$) из стали *40Х* при режимах $V=52.2$ *м/мин,* $F=100;200;300;400;500$ *Н* и $S=0.050;0.100;0.150$ *мм/об* для каждого значения F, которые обеспечили глубину упрочненного слоя $\Delta h=0\cdots0.15$ *мм*.

Классификацией полученных значений создана база данных и получены регрессионные уравнения (2), позволяющие составить отдельные системы уравнений, ко-

торые фактически являются математическими моделями конкретных задач производства. Другой особенностью такого подхода является возможность комплексного получения всех оптимальных значений указанных параметров с использованием номографического метода [9] представления уравнений (2). Такими специальными функциями являются:

$$\Phi_2\left[\left(F,S\right),\left(\Delta h,HV,HV_{max}\right)\right]=0, \tag{3}$$

$$\Phi_3\left[\left(F,S\right),\left(\Delta h,HV,x,y\right)\right]=0, \tag{4}$$

$$\Phi_4\left[\left(F,S\right),\left(HV,HV_{max},\Delta h\right),\left(R_a,R_z,R_{max}\right)\right]=0, \tag{5}$$

$$\Phi_5\left[\left(F,S\right),\left(d,\alpha_\sigma\right),\left(\bar{\sigma}_{Rv},lg\bar{N}_{Gv},\bar{m}_v,\bar{C}_v\right),\left(HV_{max},\Delta h\right)\right]=0, \tag{6}$$

для решения которых необходимо выявить закономерности изменения R_a, R_z, R_{max} и $HV, HV_{max}, \Delta h$ на поверхностях и наклонных площадках образцов (рис. 1).

Разнообразное изменение HV в связи с вариацией Δh_i для решения систем (3)-(5) предполагает рассмотрение HV в координатных системах (HV, x, y), $\left(\Delta h, x, y\right)$ (рис. 1).

Для этого необходимо определить геометрические параметры отдельных участков контура и наклонной площадки, в пределах которых вид функций $HV=p_1\left(x,y\right)$ или $HV=p_2\left(x\right)$, $HV=p_3\left(y\right)$ остается неизменным (рис. 1):

а) $KOB, 0\cdots x_1, 0\cdots\pm y_1$; б) $KK'B'B$, $\Delta x_1=\left(x_2-x_1\right), \Delta y_1=\pm\left(y_2-y_1\right)$; в) $K'CC'E$ и $B'DD'E$, $\Delta x_2=\left(x_3-x_2\right)$, $\Delta y_2=\pm\left(y_3-y_2\right)$; г) $C'ED'$, Δx_2, $\Delta y_3=0\cdots\pm y_3'$. По всему контуру и на участке KOB, где глубина снятого слоя незначительна ($\Delta h_i=0\cdots0.0245$ *мм*), получается $HV=HV_{maxi}=const$, а на участке $C'ED'$, где фактически полностью снят упрочненный слой, имеет место $HV=HV_0=const$. На остальных участках вид функции $HV=p_1\left(x,y\right)$ сохраняется. Учитывая переменность геометрических параметров, получены также регрессионные уравнения дополнительных функций:

$$HV=p_2\left(x\right),\ HV=p_3\left(y\right),\ A_1=\psi_1\left(F,S\right),\ A_2=\psi_2\left(F,S\right),\ x_1=\psi_3\left(F,S\right),$$
$$x_2=\psi_4\left(F,S\right),\ y_3=\psi_5\left(F,S\right),\ \Delta x_1=\psi_6\left(F,S\right),\ \Delta x_2=\psi_7\left(F,S\right), \tag{7}$$

где A_1 и A_2 – площади участков KOB и $C'ED'$, *мм*.^{2}.

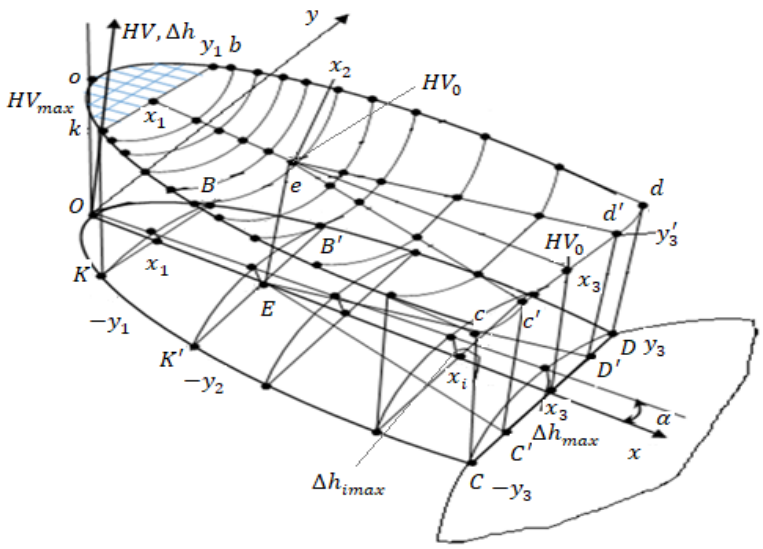


Рис. 1. Функция $HV = \varphi_3\left(x, y\right)$ в системе координат (HV, x, y)

Классификация и совместная обработка результатов ранее выполненных исследований и данных настоящей работы методами регрессионного анализа позволили получить около 200 уравнений функций (6), (7) при различных сочетаниях/количествах их аргументов и параметров при $R^2 = 0.91 \cdots 0.99$, которые классифицированы следующим образом: прямолинейные - 32%; параболические 2-й степени - 41% и 3-й степени - 13%; гиперболические со степенью $m = -\left(0.11 \cdots 0.20\right)$ - 4%; постоянные функции - 10%. Решение специальных задач предполагает их использование в комплексном виде, выбирая из (2) взаимосвязанные функции, исходя из требований, предъявляемых к конструкции и эксплуатации машины. Такой является функция (5), а вторым этапом расчетных процедур - совместное представление уравнений (2) в I-IV квадрантах координатной системы методами номографии (рис. 2). Это позволит простыми графическими построениями в оперативном порядке получить оптимальные значения параметров ППД и состояния поверхностных слоев, не прибегая к справочным и производственно–нормативным материалам.

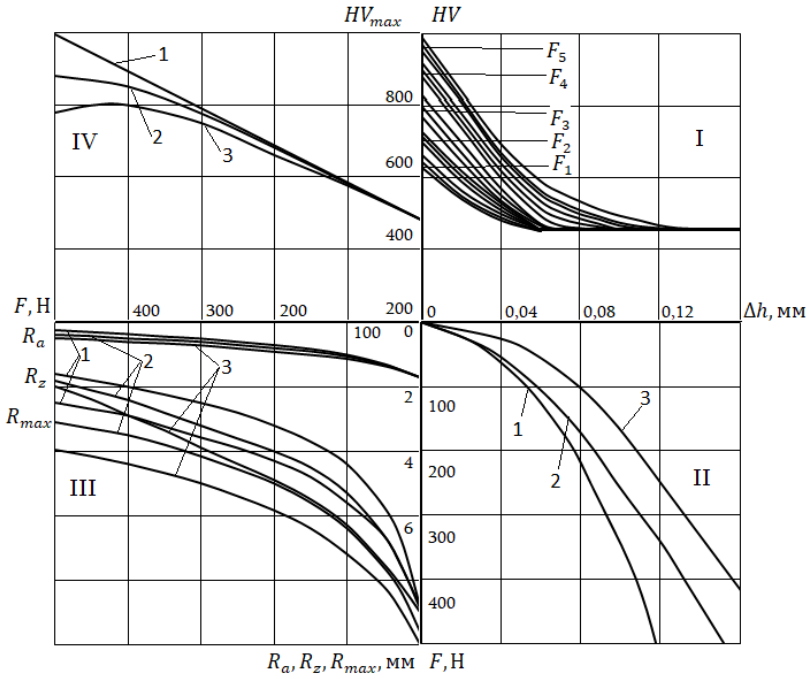


Рис. 2. Номограмма функции

$$\Phi_4\left[\left(F,S\right),\left(HV,HV_{max},\Delta h\right),\left(R_a,R_z,R_{max}\right)\right]=0\,.$$

В квадрантах $I,\cdots,IV$ представлены функции: I - $HV=\varphi_1\left(\Delta h\right)$,

II - $\Delta h=f_1\left(F,S\right)$, III - $R_a,R_z,R_{max}=f_{3,4,5}\left(F,S\right)$,

IV - $HV_{max}=f_2\left(F,S\right)$. Кривые 1, 2, 3 соответствуют значениям

$S=0.050;0.100$ и 0.155 мм/об.

В более расширенном виде оформлена многопараметрическая функция (6), в которую включены 4 подгруппы параметров, входящих в структуры 6 уравнений из (2). Функция (6) при ее номографическом представлении (рис. 3) позволяет выполнить также дополнительные оценки геометрии деталей, материалоемкости и циклической долговечности при ППД, которые ранее не проводились. Как показывает относительное расположение линий усталости $\left(\bar{\sigma}_{Rv},lg\bar{N}_{Gv},\bar{m}_v,\bar{C}_v\right)$, эффективность ППД на циклическую долговечность при высоких значениях α_σ также повышается и практически уравновешивает влияние концентрации напряжений, что является новизной данного исследования.

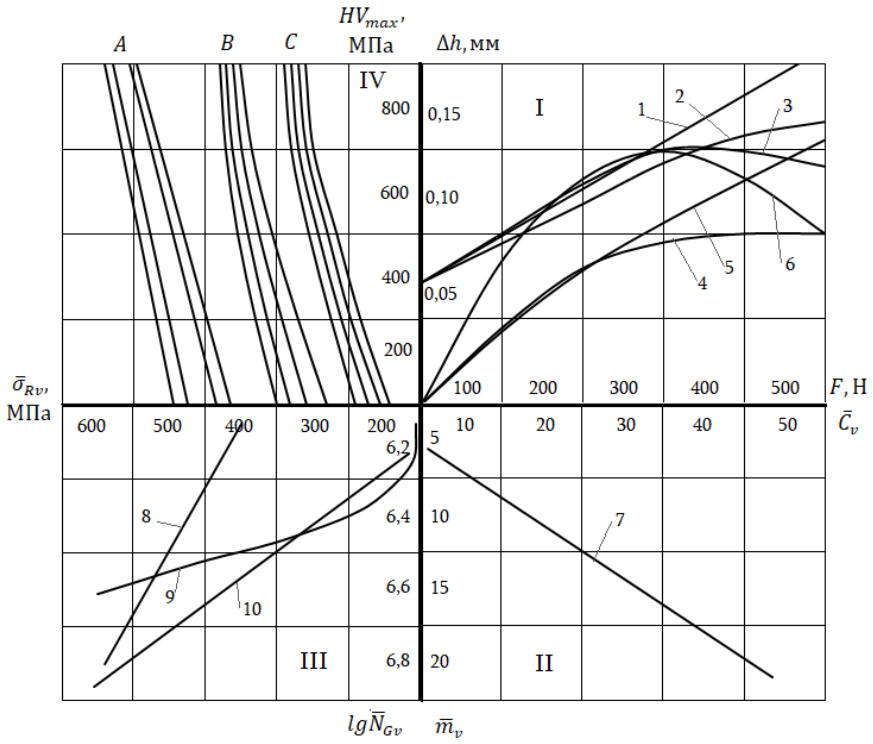


Рис. 3. Номограмма функции

$$\Phi_5\left[\left(F,S\right),\left(d,\bar{\alpha}_\sigma\right),\left(\bar{\sigma}_{Rv},lg\bar{N}_{Gv},\bar{m}_v,\bar{C}_v\right),\left(HV_{max},\ \Delta h\right)\right]=0.$$

В квадрантах $I,\cdots,IV$ представлены функции: I. 1, 2, 3 - $HV_{max}=f_2\left(F,S\right)$ и 4, 5, 6 - $\Delta h=f_1\left(F,S\right)$ при $S=0.050;0.100;0.155$ мм/об.;

II. 7 - $\bar{C}_{(v)}=\varphi_6\left(\bar{m}_{(v)}\right)$; III. 8, 9 - $\bar{\sigma}_{R(v)}=\varphi_9\left(lg\bar{N}_{G(v)},\bar{\alpha}_\sigma\right)$ при $\alpha_{\sigma1}=1,00$ и $\alpha_{\sigma2,3,4}=1,05\cdots3,12$, 10 - $\bar{m}_{(v)}=\varphi_5\left(\bar{\sigma}_{R(v)}\right)$; IV. A, B, C - $\bar{\sigma}_{R(v)}=\varphi_3\left(\Delta h,d,\bar{\alpha}_\sigma\right)$ при $d=7,5,10,15,20$ мм и $\alpha_{\sigma1}=1.00$, $\alpha_{\sigma2}=1.05\cdots1.69$, $\alpha_{\sigma3,4}=1.70\cdots3.12$

Основные выводы. Выполнен комплексный анализ ранее проведенных исследований, посвященных изучению влияния ППД на показатели усталостной прочности деталей и узлов машин, и произведена классификация работ по типу конструкционных материалов, ППД, геометрическим параметрам и состоянию поверхностных слоев деталей. Составлена база данных по параметрам факторов и характеристикам сопротивления усталости $\bar{C}_{(v)}$, $\bar{m}_{(v)}$, $\bar{N}_{G(v)}$ и $\bar{\sigma}_{R(v)}$ деталей из стали *40Х*. Для оптимальной оценки влияния факторов составлена сводная математическая модель ППД в виде многопараметрической функциональной связи, которая для

практических целей заменена частными системами параметрических уравнений. Получены регрессионные уравнения указанных систем, которые позволяют получить взаимосвязанные оптимальные значения всего комплекса параметров без выполнения дополнительных испытаний.

Показано, что выявленные функциональные связи, которые являются частными математическими моделями ППД, подтверждают улучшение состояния поверхностных слоев и повышение прочности деталей. ППД эффективно компенсирует совместное влияние масштабного эффекта и концентрации напряжений, приближая $\overline{\sigma}_{R(v)}$ к исходным значениям гладких образцов. Анализ влияния ППД на показатели действующих факторов при различных сочетаниях доминантности параметров Δh, d и $\overline{\alpha}_{\sigma}$, выдвигаемой требованиями расчетно –технологических и эксплуатационных процедур проектируемой конструкции, показал возможность применения в расчетах ранее не учтенных показателей. Получены сводные номограммы, применением которых решаются задачи выбора оптимальных параметров ППД, уточняются характеристики работоспособности деталей, достигаются низкие материалоемкость и себестоимость конструкции, которые в заданном сроке службы обеспечат надежную и безопасную работу.

Выполненная работа позволяет предложить следующие мероприятия: выбрать экономически приемлемый и доступный вид ППД применительно к деталям типа тел вращения [14], обосновать использование недорогих среднеуглеродистых и низколегированных конструкционных сталей [15], создать оптимальную глубину упрочнения поверхностного слоя деталей при высокой микротвердости и величине остаточных сжимающих напряжений [16], предложить математическую модель упрочнения[17].

ЛИТЕРАТУРА

1. Ստակյան Մ.Գ., Ղալեչյան Ն.Ս. Լիսեռների հոգնածային կոտրվածքների համալիր ուսումնասիրումը և արատաորոշումը // ՀՊՃՀ Տար. գիտաժող. նյութ. ժող., Երևան, 2001.- Հ. 1.- էջ 203-205:
2. Агамиров Л.В., Лисин А.Н., Мозалев В.В. Прогнозирование сопротивления усталости барабанов авиационных колес, подверженных поверхностному пластическому деформированию // Упрочняющие технологии и покрытия. - 2011. - № 3. - С. 8-15.
3. Стакян М.Г., Систани Ш. Дж., Торосян М.С. Оценка характеристик сопротивления усталости упрочненных валов. Вестн. Инж. Акад. Армении. – 2013. – Т. 10, №2. – С. 309-313.
4. Fatigue and Fracture of Engineering Materials and Structures. - 2002.- V. 25.- N 8/9.
5. Когаев В.П. Расчеты на прочность при напряжениях, переменных во времени.- Москва: Машиностр., 2003.- 232 с.
6. Степнов М.Н., Шаврин А.В. Статические методы обработки результатов механических испытаний: Справочник, Москва, «Машиностр.», 2005, 400с.
7. Стакян М.Г., Оганесян Л.Г., Манукян Г.А. Корреляционный и регрессионный анализ результатов механических испытаний, Алгоритмы и программы: Инф. бюл. ВИНИТИ Центр, ГФАП СССР, ЦИФ, 1990, N 5, 7с.

8. Стакян М.Г., Джрбашян Т.Э., Мнацаканян А.С. Вероятностные методы расчета относительной прочности и долговечности деталей машин, Алгоритмы и программы: Инф. бюл. Всерос.Науч.-техн. инф. центра, 1992, N 3-6, 9с.
9. Хованский Г.С. Основы номографии, Москва, «Наука», 1986, 325с.
10. Систани Ш.Дж., Торосян М.С. Оценка сопротивления усталости деталей при поверхностном пластическом деформировании // Вестн. ГИУА(П). Механика, машиноведение, машиностроение. – 2013. - №2.- С. 58-63.
11. Bhadeshia H.K., Francis J.A., Stone H.J. Transformation plasticity in steel weld metals //In: Proc. of 10th Internat. Aachen Welding conf.- 2007.- P. 22-25.
12. Стакян М.Г., Систани Ш.Дж., Айказян М.Э. Моделирование физико-механического состояния поверхностных слоев деталей с применением упрочняющих технологий. //Вестн. ГИУА (П). Сер. Механика, машиновед., машиностр. - 2013. -Вып. N 3.- С. 52-58.
13. Стакян М.Г., Систани Ш.Дж., Торосян М.С. Оценка прочности и долговечности деталей машин при поверхностном пластическом деформировании. // Изв. НАН РА и ГИУА. Сер. ТН, 2013, Т.66, №2, С. 95-102.
14. Փիրումյան Ն.Վ., Թորոսյան Մ.Ս., Ստակյան Մ.Գ. Մեքենամասերի հոգնածային դիմադրության բարձրացումը ամրացնող տեխնոլոգիաների կիրառմամբ //ՃՇՀԱՀ Տեղեկագիր.-2019.- № 1(62).-էջ 31-39:
15. Федонин О.Н., Степашина С.В. Научное обоснование выбора режимов обработки при поверхностном пластическом деформировании //Вестн. БГТУ.- 2011.- №1. - С.4-8.
16. Жарский И.М. и др. Технологические методы обеспечения надежности машин. – Минск: Высш. шк., 2010. – 336 с.
17. Суслов А.Г., Гуров Р.В. Проектирование операций отделочно-упрочняющей обработки поверхностно-пластическим деформированием. Упрочняющие технологии и покрытия. -2010.- №3 - С.14 - 17.

Сведения об авторах

Торосян Мгер Сережаевич – кандидат технических наук, научный сотрудник Института механики, ассистент каф. «Машиноведения и машиностроения» НПУА, тел. +374-55-72-82-22, e-mail: mhertorosyan@list.ru

Стакян Мигран Григорьевич – доктор технических наук, проф., НУАСА,
тел. +374-33-55-45-60, e-mail: stakyan.mihran@yandex.ru

Поступила в редакцию 12 апреля 2026