

**МИНИМИЗАЦИЯ УСТАЛОСТНЫХ ЯВЛЕНИЙ В СВАРНЫХ ШВАХ  
МЕТАЛЛИЧЕСКИХ ТРУБ С ПРИМЕНЕНИЕМ УПРОЧНЯЮЩИХ ТЕХНОЛОГИЙ**

**Торосян М.С., Стакян М.Г.**

**Ключевые слова:** газотранспортная система, газопровод, сварной шов, усталость, упрочняющая технология, деформированный слой, сжимающее напряжение.

**Torosyan M.S., Stakyan M.G.**  
**Minimizing Fatigue in Welded Joints of Metal Pipes Using Strengthening Technologies**

**Key words:** gas transportation system, gas pipeline, weld seam, fatigue, strengthening technology, deformed layer, compressive stress.

Fatigue phenomena under cyclic loading of the gas transport system are considered, occurring in welded seams of pipelines, which initiate fatigue damage in the micro-roughness of the working surfaces of the seams and can lead to their failure and cessation of gas supply. To prevent such failures, it is proposed to perform plastic deformation of the outer surfaces of the welded seams, which allows the residual compressive stresses in the deformed seam layer to counteract cyclic stresses. The physical and mechanical characteristics of the specified layer material have been studied, which depend on the parameters of the deformation technology, internal composition, and microstructure, as well as the ductility of the steel grade. By using low- and medium-carbon steels with high ductility and employing strengthening technology, their physical and mechanical characteristics can be brought to values comparable to those of high-alloy steels and replaced with medium-carbon steels with low cost, which, when used in the installation of gas pipelines of sufficient length, can ensure the profitability of the gas transportation facility.

**Թորոսյան Մ.Ս., Ստակյան Մ.Գ.**

**Մետաղական խողովակների եռակցման կարերում առաջացող հոգնածային երևույթների  
նվազարկումն ամրացնող տեխնոլոգիաների կիրառմամբ**

**Հիմնաբաներ՝** գազատրանսպորտային համակարգ, գազատար, եռակցման կար, հոգնածություն, ամրացնող տեխնոլոգիա, դեֆորմացված շերտ, սեղմող լարում:

Դիտարկվում են գազատրանսպորտային համակարգի ցիկլային բեռնվածության պայմաններում աշխատող գազատարների եռակցված կարերում ընթացող հոգնածային երևույթները, որոնց աշխատանքային մակերևույթների միկրոանհարթություններում առաջացող հոգնածային վնասվածքներն աճելով կարող են կարերի քայքայման և գազամատակարարման դադարեցման պատճառ դառնալ: Նշված քայքայումներին դիմակայելու նպատակով առաջադրվում է կատարել եռակցված կարերի արտաքին մակերևույթների պլաստիկ դեֆորմացում, որի շնորհիվ կարի դեֆորմացված շերտում առաջացած մնացորդային սեղմող լարումները կարող են ազդեցություն ունենալ ցիկլային լարումները: Ուսումնասիրված են նշված շերտի նյութի ֆիզիկամեխանիկական բնութագրերը, կախված դեֆորմացման տեխնոլոգիայի պարամետրից, կարում օգտագործված պողպատի ներքին բաղադրությունից, միկրոկառուցվածքից և պլաստիկությունից: Բարձր պլաստիկությամբ օժտված ցածր և միջին ածխածնային պողպատների կիրառման դեպքում ամրացնող տեխնոլոգիայի կիրառման շնորհիվ կարելի է հասնել բարձր լեզբիված պողպատների ֆիզիկամեխանիկական բնութագրերին և դրանց փոխարինել համեմատաբար ցածր ինքնարժեքի միջին ածխածնային պողպատներով, որը զգալի երկարությամբ մոնտաժված խողովակաշարերի դեպքում ապահովում է տեղակայման տնտեսական շահավետությունը:

Рассматриваются усталостные явления в условиях циклического нагружения газотранспортной системы, протекающие в сварных швах газопроводов, которые инициируют усталостные повреждения в микронеровностях рабочих поверхностей швов и могут стать причиной их разрушения и прекращения подачи газа. С целью предотвращения указанных разрушений предложено выполнить пластическое деформирование наружных поверхностей сварных швов, благодаря чему остаточные сжимающие напряжения, возникшие в деформированном слое шва, могут противостоять циклическим напряжениям. Изучены физико-механические характеристики материала указанного слоя, зависящие от параметров технологии деформирования, внутреннего состава и микроструктуры, а также пластичности марки стали. При использовании низко- и среднеуглеродистых сталей с высокой пластичностью применением упрочняющей технологии их физико-механические характеристики можно довести до аналогичных значений для высоколегированных сталей и заменить их среднеуглеродистыми сталями с низкой себестоимостью, которые при монтаже газопроводов с достаточной протяженностью могут обеспечить рентабельность газотранспортной установки.

## Введение

Расширение сети газотранспортных систем (ГТС), что характерно для стран с развитой промышленностью, сельским хозяйством и социальной инфраструктурой, связано с усовершенствованием всего комплекса расчетно-проектных, технологических, материаловедческих и эксплуатационных процедур ответственных элементов (например, сварных швов трубопроводов) конструкций ГТС. При этом экономическая рентабельность создания газопроводов ГТС обеспечивается применением в трубопроводах малоуглеродистых и низколегированных конструкционных сталей [1, 2, 3].

ГТС обычно эксплуатируется в условиях комплексного воздействия факторов, вызванных режимом нагружения, геометрией элементов, трибологией и износом, коррозией окружающей среды и сейсмичностью зоны прокладки газопровода, которые проявляются и действуют в различных сочетаниях и количествах. Микроповерхностное состояние рабочих поверхностей элементов (рис. 1) в значительной степени воздействует на усталостную прочность и износостойкость, а применение упрочняющих технологий повышает их несущую способность, приближая физико-механические характеристики малоуглеродистых конструкционных сталей к аналогичным значениям для многоуглеродистых и высоколегированных сталей [4, 5, 6, 7]. Учитывая это обстоятельство, в исследовательских организациях подробно изучены условия упрочнения с поверхностным пластическим деформированием (ППД) и сконструированы необходимые упрочняющие инструменты. Но указанные работы носят сравнительно узкий и конкретный характер учета метода упрочнения без комплексного изучения действующих факторов микрогеометрии и рабочей поверхности элементов [8, 9, 10] (рис.1).

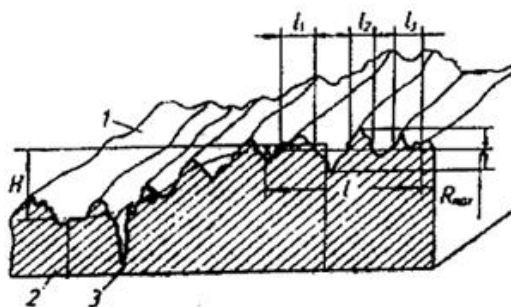


Рис. 1. Микрорельеф поверхности сварного шва и его геометрические параметры:  
1-продольные микронеровности, 2-поперечные микронеровности, 3-микротрещина

Анализ воздействия факторов свидетельствует о том, что основным из них является процесс усталостного разрушения сварных швов, который приводит к примерно 75–80% -ому выходу из строя газопроводов из-за высокой степени концентрации напряжений ( $\alpha_\sigma \approx 2.75$ ), вызывающей возникновение и рост усталостных микро-трещин. Применение ППД в достаточной степени уменьшает процесс усталостного воздействия за счет появления остаточных сжимающих напряжений в подповерхностных слоях сварных швов трубопроводов [11, 12, 13].

#### Метод исследования

Целью исследования является повышение несущей способности и эксплуатационной надежности сварных швов трубопроводов ГТС, применяя методы системного анализа, материаловедения, строительной механики и математической статистики для учета комплексного воздействия факторов, и выбор приоритетного из них, для которого логично использовать упрочняющую технологию (ППД). Эффективность ППД связана с благоприятным воздействием остаточных сжимающих напряжений, глубина расположения которых связана с параметрами режима упрочнения при обкатке поверхностей сварных швов. Пластичность малоуглеродистых конструкционных сталей способствует к возникновению в поверхностных слоях остаточных сжимающих напряжений, которые повышают эффект сопротивления усталости, минимизируя циклические перенапряжения [14, 15, 16].

Учитывая необходимость повышения сопротивления усталости элементов, спроектированы совместно действующее упрочняющее устройство и прибор для нанесения антикоррозионной пленки после упрочнения шва, а также оформлена технология ППД, которые запатентованы в Республике Армения [17, 18].

Обеспечение эксплуатационной надежности элементов ГТС, учитывая комплексное взаимодействие разнородных факторов, является сложной проблемой, связанной с организацией совместной работы специалистов разных технических наук и технологий, поэтому на данном этапе как приоритетные факторы будут рассмотрены вопросы повышения сопротивления усталости элементов и эффект влияния ППД [19,20].

Математическая модель несущей способности элементов ГТС в случае воздействия нескольких факторов имеет вид

$$\Phi_1 \left[ (F, S), (d, \alpha_\sigma), (\bar{\sigma}_{Rv}, \lg \bar{N}_{Gv}, \bar{m}_v, \bar{C}_v), (HV, \Delta h), (R_a, R_z, R_{\max}) \right] = 0, \quad (1)$$

где  $F, S$  – нормальная сила упрочнения и продольная подача инструмента,  $d, \alpha_\sigma$  – диаметр образца и коэффициент концентрации напряжений;  $\bar{\sigma}_{Rv}, \lg \bar{N}_{Gv}, \bar{m}_v, \bar{C}_v$  – средневероятные параметры линии усталости;  $HV, \Delta h$  – микротвердость по Викерсу и глубина упрочненного слоя,  $R_a, R_z, R_{\max}$  – поверхностные неровности образца.

Многопараметрическая функция (1), в которую включены 5 подгрупп параметров, позволяет выполнить также дополнительные оценки геометрии деталей, материаловедности и циклической долговечности при ППД, которые ранее не проводились. Как показывает относительное расположение линий усталости  $(\bar{\sigma}_{Rv}, \lg \bar{N}_{Gv}, \bar{m}_v, \bar{C}_v)$ , эффективность ППД на циклическую долговечность при высоких значениях  $\alpha_\sigma$

также повышается и практически уравнивает влияние концентрации напряжений, что является новизной данного исследования.

### Результаты исследования

Дана обобщенная оценка циклической прочности с использованием коэффициентов усталости:  $K_d$  - масштабного;  $K_F$  - микрогеометрии поверхности ( $K_d, K_F \leq 1$ );  $K_\sigma$  - концентрации напряжений;  $K_v$  - упрочнения ( $K_\sigma, K_v \geq 1$ );  $K_D = K_\sigma / (K_d \cdot K_F \cdot K_v) \geq 1$  - суммарного, а также исходных пределов выносливости лабораторных образцов ( $d = 7.5 \dots 20 \text{ мм}$ )  $\bar{\sigma}_{R(v)}$ .

Структура коэффициентов указывает на их взаимосвязанность, что позволяет для расчета их значений использовать комплексный метод оценки. При этом математическую модель ППД можно представить в виде функции

$$\Phi_2 \left[ (\Delta h, d, \bar{\alpha}_\sigma), (K_{d\sigma}, K_\sigma, K_{v\sigma}, K_{\sigma D}, \bar{\sigma}_{R(v)}) \right] = 0. \quad (2)$$

Структура функции (2) зависит от характера предложенной проблемы исследования, формирующего систему уравнений с определенными подгруппами параметров и устанавливающего внутри подгрупп их доминантность, исходя из степени важности одного из действующих факторов. Исходя из вышеуказанного, функцию (2) можно заменить двумя системами параметрических уравнений:

$$1) \text{ отдельные уравнения } K_{d\sigma}, K_\sigma, K_{v\sigma}, K_{\sigma D} = f_{1,2,3,4}(\Delta h, d, \bar{\alpha}_\sigma) \text{ и } \bar{\sigma}_{R(v)} = f_5(\Delta h, d, \bar{\alpha}_\sigma)$$

при разной доминантности параметров  $\Delta h, d, \bar{\alpha}_\sigma$ ;

$$2) \text{ уравнения с взаимосвязанными коэффициентами } K_{d\sigma}, K_\sigma, K_{v\sigma}, K_{\sigma D}, \text{ пределами выносливости } \bar{\sigma}_{R(v)} \text{ и параметрами } \Delta h, d, \bar{\alpha}_\sigma.$$

1. Согласно методу системного анализа, для п.1 возможно 6 вариантов доминантности  $\Delta h, d, \bar{\alpha}_\sigma$ , из которых рассмотрены часто встречающиеся 3 варианта для оценки ППД ( $\Delta h$ ), размеров ( $d$ ) и концентрации напряжений ( $\bar{\alpha}_\sigma$ ), формирующих следующие подгруппы уравнений:

| I  | II   | III   |     |
|--|--|---|-----|
| $K_{d\sigma} = f_1(\Delta h, d, \bar{\alpha}_\sigma),$         | $K_{d\sigma} = \varphi_1(d, \Delta h, \bar{\alpha}_\sigma),$         | $K_{d\sigma} = \psi_1(\bar{\alpha}_\sigma, \Delta h, d),$         |     |
| $K_\sigma = f_2(\Delta h, d, \bar{\alpha}_\sigma),$            | $K_\sigma = \varphi_2(d, \Delta h, \bar{\alpha}_\sigma),$            | $K_\sigma = \psi_2(\bar{\alpha}_\sigma, \Delta h, d),$            |     |
| $K_{v\sigma} = f_3(\Delta h, d, \bar{\alpha}_\sigma),$         | $K_{v\sigma} = \varphi_3(d, \Delta h, \bar{\alpha}_\sigma),$         | $K_{v\sigma} = \psi_3(\bar{\alpha}_\sigma, \Delta h, d),$         | (3) |
| $K_{\sigma D} = f_4(\Delta h, d, \bar{\alpha}_\sigma),$        | $K_{\sigma D} = \varphi_4(d, \Delta h, \bar{\alpha}_\sigma),$        | $K_{\sigma D} = \psi_4(\bar{\alpha}_\sigma, \Delta h, d),$        |     |
| $\bar{\sigma}_{R(v)} = f_5(\Delta h, d, \bar{\alpha}_\sigma),$ | $\bar{\sigma}_{R(v)} = \varphi_5(d, \Delta h, \bar{\alpha}_\sigma),$ | $\bar{\sigma}_{R(v)} = \psi_5(\bar{\alpha}_\sigma, \Delta h, d),$ |     |
| $(x = \Delta h),$  | $(x = d),$   | $(x = \bar{\alpha}_\sigma).$                                      |     |

С целью выполнения расчетов из базы данных [9, 12, 19, 20, 21] (совместный циклический изгиб и кручение) для  $\Delta h_{1-4} = 0 \dots 0.15 \text{ мм}$ ,  $d_{1-4} = 7.5 \dots 20.0 \text{ мм}$  и  $\bar{\alpha}_{\sigma 1-4} = 1.00 \dots 2.75$  выбраны 64 средневероятные кривые усталости для образцов – гладких и с концентрацией напряжений (галтель, поверхностная выточка, сплошное поперечное отверстие) и по величинам  $\bar{\sigma}_{R(v)}$  определены значения  $K_{d\sigma}, K_{\sigma}, K_{v\sigma}$  и  $K_{\sigma D}$ , которые распределены в подгруппах I, II, III. При этом для каждой подгруппы получено по 80 уравнений (3). В подгруппе функций I ( $x = \Delta h$ ) рассмотрены изменения коэффициентов и  $\bar{\sigma}_{R(v)}$  при доминантном учете ППД. Для крайних значений  $\Delta h = 0.15 \text{ мм}$  и  $\bar{\alpha}_{\sigma 4} = 2.75$  исходные значения  $K_{d\sigma} = 0.82 \dots 0.94$  достигают  $0.90 \dots 0.98$ , т.е. эффект упрочнения несколько подавляет влияние масштабного фактора. Существенное влияние ППД проявляется при высокой концентрации напряжений, снижая значения  $K_{\sigma} = 2.5 \dots 2.6$  до  $1.6 \dots 1.8$ , а суммарный коэффициент  $K_{\sigma D}$  уменьшается от 3.1 до 1.6. Для  $\bar{\sigma}_{R(v)}$ , комплексно учитывающего влияние всех коэффициентов, увеличение значений достигает  $75 \dots 95\%$ , т.е. при ППД предел выносливости достигает исходных значений при  $\Delta h_1 = 0$  и  $\bar{\alpha}_{\sigma 1,2} = 1.0 \dots 1.5$ .

В подгруппе функций II ( $x = d$ ) с увеличением  $d$  и  $\Delta h$  значения коэффициента  $K_{d\sigma}$  стабилизируются и достигают величины, соответствующей  $\bar{\alpha}_{\sigma 2} = 1.5$ . При  $d = 20.0 \text{ мм}$  процесс упрочнения уменьшает влияние концентрации напряжений до 40%. Коэффициент упрочнения  $K_{v\sigma}$  при  $\Delta h_4 = 0.15 \text{ мм}$  и  $d_4 = 20.0 \text{ мм}$  почти полностью подавляет совместное действие  $K_{d\sigma}$  и  $K_{\sigma}$ , а следовательно, их действие и на  $\bar{\sigma}_{R(v)}$ .

В подгруппе функций III ( $x = \bar{\alpha}_{\sigma}$ ) влияние  $\bar{\alpha}_{\sigma}$  присутствует во всех деталях, упрочнение их контуров является обязательным условием для обеспечения циклической прочности и долговечности. При  $d_4 = 20.0 \text{ мм}$  и  $\bar{\alpha}_{\sigma} = 1.0$  снижение значений  $\bar{\sigma}_{R(v)}$  достигает 22%, а упрочнение поверхностей до  $\Delta h_4 = 0.15 \text{ мм}$  восстанавливает и даже увеличивает значения  $\bar{\sigma}_{R(v)}$  на  $10 \dots 14\%$ . Этот процесс существенно проявляется при  $\bar{\alpha}_{\sigma} = 1.5 \dots 1.75$  – снижение  $\bar{\sigma}_{R(v)}$  составляет  $45 \dots 95\%$ , а при упрочнении  $\bar{\sigma}_{R(v)}$  достигает исходных значений при  $\Delta h = 0$ . При  $\bar{\alpha}_{\sigma} = 2.5 \dots 3.5$  это снижение достигает  $155 \dots 200\%$ , что приводит к необходимости в обязательном порядке применять ППД, уменьшающее это снижение до  $6 \dots 14\%$  от исходных значений  $\bar{\sigma}_{R(v)}$ .

На рис. 2-4 представлены функции  $\bar{\sigma}_{R(v)}$  из п/г I, II, III, комплексно учитывающие совместное действие указанных коэффициентов. При этом выявляется основное преимущество применения ППД – при умеренной концентрации напряжений пределы выносливости упрочненных деталей приближаются к  $\bar{\sigma}_{R(v)}$  неупрочненных гладких деталей, а при высокой концентрации – к  $\bar{\sigma}_{R(v)k}$  деталей с умеренной концентрацией напряжений, т.е. упрочнение подавляет действие  $K_\sigma$  на  $\bar{\sigma}_{R(v)}$ .

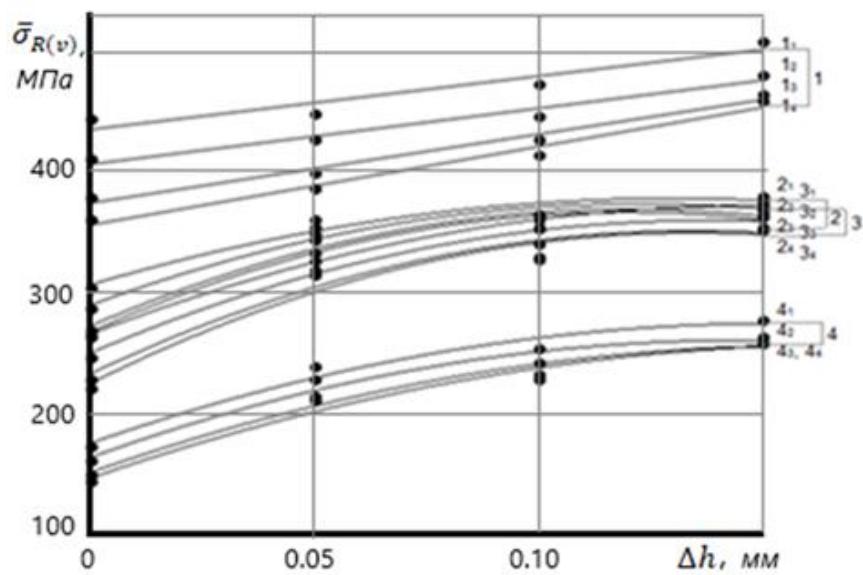


Рис. 2. Изменения функций  $\bar{\sigma}_{R(v)} = f_5(\Delta h, d, \bar{\alpha}_\sigma)$ :  $1, \dots, 1_4, 2, \dots, 2_4, 3, \dots, 3_4, 4, \dots, 4_4$  – при  $\bar{\alpha}_{\sigma 1}, \bar{\alpha}_{\sigma 2}, \bar{\alpha}_{\sigma 3}, \bar{\alpha}_{\sigma 4}$ ; индексы  $1, \dots, 4$  соответствуют:  $d_1, d_2, d_3, d_4$

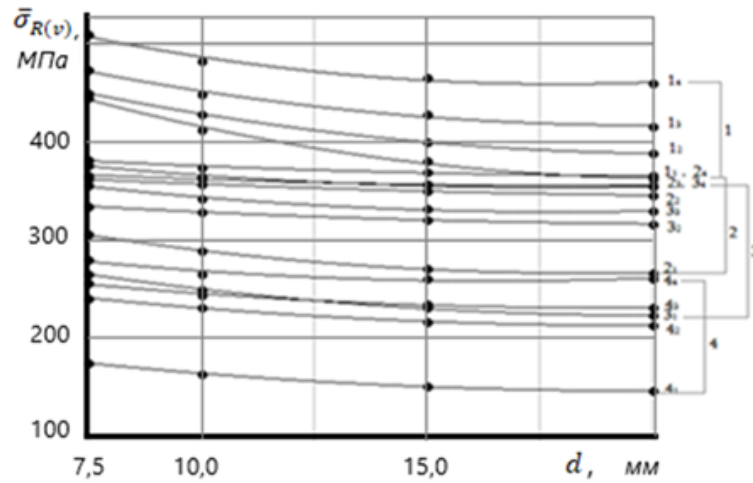


Рис. 3. Изменения функций  $\bar{\sigma}_{R(v)} = \varphi_5(d, \Delta h, \bar{\alpha}_\sigma)$ :  $1_1, \dots, 1_4, 2_1, \dots, 2_4, 3_1, \dots, 3_4, 4_1, \dots, 4_4$  – при  $\bar{\alpha}_{\sigma 1}, \bar{\alpha}_{\sigma 2}, \bar{\alpha}_{\sigma 3}, \bar{\alpha}_{\sigma 4}$ ; Индексы  $1, \dots, 4$  соответствуют:  $\Delta h_1, \Delta h_2, \Delta h_3, \Delta h_4$

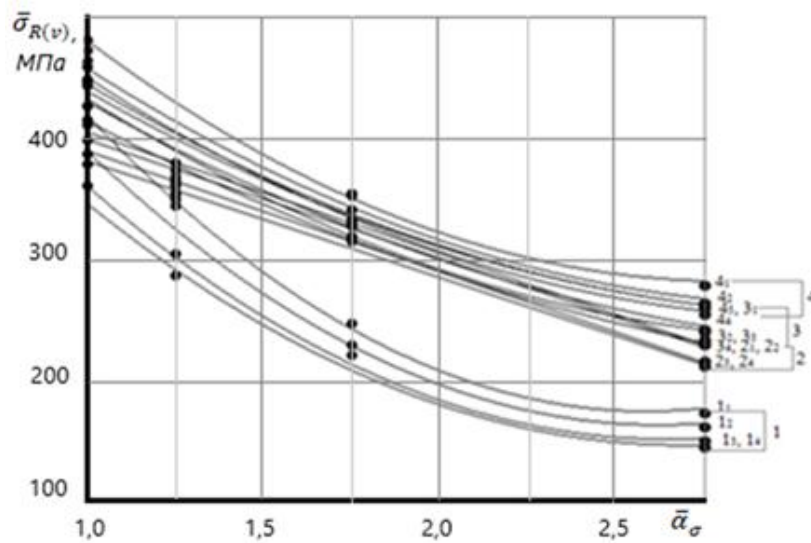


Рис. 4. Изменения функций  $\bar{\sigma}_{R(v)} = \psi_5(\bar{\alpha}_\sigma, \Delta h, d)$ :  $1_1, \dots, 1_4, 2_1, \dots, 2_4, 3_1, \dots, 3_4, 4_1, \dots, 4_4$  – при  $d_1, d_2, d_3, d_4$ . Индексы  $1, \dots, 4$  соответствуют:  $\Delta h_1, \Delta h_2, \Delta h_3, \Delta h_4$

2. Комплексное рассмотрение изменений коэффициентов  $K_{d\sigma}, K_\sigma, K_{v\sigma}, K_{\sigma D}$  и  $\bar{\sigma}_{R(v)}$  от действующих факторов, продиктованное требованиями обеспечения несущей способности деталей, предполагает выявление взаимосвязанных функций.

В отличие от (3), при таком подходе число аргументов функций увеличивается и аналогичные системы уравнений принимают вид

$$\begin{array}{llll}
1. K_{d\sigma} = f_1(\Delta h, d, \bar{\alpha}_\sigma) & x = \Delta h & 6. K_{d\sigma} = \varphi_1(d, \Delta h, \bar{\alpha}_\sigma) & x = d \\
2. K_{d\sigma} = F_2(K_\sigma, \Delta h, d, \bar{\alpha}_\sigma) & x = K_\sigma & 7. K_{d\sigma} = \Phi_2(K_\sigma, d, \Delta h, \bar{\alpha}_\sigma) & x = K_\sigma \\
3. K_{v\sigma} = F_3(K_\sigma, \Delta h, d, \bar{\alpha}_\sigma) & x = K_\sigma & 8. K_{v\sigma} = \Phi_3(K_\sigma, d, \Delta h, \bar{\alpha}_\sigma) & x = K_\sigma \\
4. K_{v\sigma} = F_4(K_{\sigma D}, \Delta h, d, \bar{\alpha}_\sigma) & x = K_{\sigma D} & 9. K_{v\sigma} = \Phi_4(K_{\sigma D}, d, \Delta h, \bar{\alpha}_\sigma) & x = K_{\sigma D} \\
5. \bar{\sigma}_{R(v)} = F_5(K_{\sigma D}, \Delta h, d, \bar{\alpha}_\sigma) & x = K_{\sigma D} & 10. \bar{\sigma}_{R(v)} = \Phi_5(K_{\sigma D}, d, \Delta h, \bar{\alpha}_\sigma) & x = K_{\sigma D} \\
11. K_{d\sigma} = \psi_1(\bar{\alpha}_\sigma, d, \Delta h) & x = \bar{\alpha}_\sigma & 12. K_{d\sigma} = \Psi_2(K_\sigma, \bar{\alpha}_\sigma, d, \Delta h) & x = K_\sigma \\
13. K_{v\sigma} = \Psi_3(K_\sigma, \bar{\alpha}_\sigma, d, \Delta h) & x = K_\sigma & 14. K_{v\sigma} = \Psi_4(K_{\sigma D}, \bar{\alpha}_\sigma, d, \Delta h) & x = K_{\sigma D} \\
15. \bar{\sigma}_{R(v)} = \Psi_5(K_{\sigma D}, \bar{\alpha}_\sigma, d, \Delta h) & x = K_{\sigma D} & & 
\end{array} \quad (4)$$

Связь между системами (3) и (4) проявляется в идентичности их функций 1-го ряда в каждой из подгрупп I-III. Такая интерпретация структур функций (4) позволяет в логической последовательности распределить их в квадрантах I-IV координатной системы при масштабной идентичности общих координатных осей и простыми графическими процедурами получить взаимосвязанные значения  $K_{d\sigma}, K_\sigma, K_{v\sigma}, K_{\sigma D}$  и  $\bar{\sigma}_{R(v)}$  при комплексном воздействии факторов геометрии и концентрации напряжений, которые уравниваются оптимальными параметрами ППД. Произведены классификация и группировка аргументов и параметров для формирования структур функций (4):

- №№ 1-5 - по аргументам  $\Delta h, K_\sigma, K_{\sigma D}$  и параметрам  $d, \bar{\alpha}_\sigma$ ;
- №№ 6-10 - по аргументам  $d, K_\sigma, K_{\sigma D}$  и параметрам  $\Delta h, \bar{\alpha}_\sigma$ ;
- №№ 11-15 - по аргументам  $\bar{\alpha}_\sigma, K_\sigma, K_{\sigma D}$  и параметрам  $d, \Delta h$ .

В итоге, для каждой функции (4) также получено по 16 регрессионных уравнений, в основном, в виде степенных уравнений  $1 \cdots 3$  порядка. Всего получено 192 двумерных регрессионных уравнения, которые сгруппированы и, согласно (4), введены в три сводные номограммы. Они могут быть использованы при конструкторских разработках, выборе технологических режимов упрочнения деталей и установлении норм и сроков эксплуатации машин. На рис. 3 дана номограмма для 1-й подгруппы функций (4).



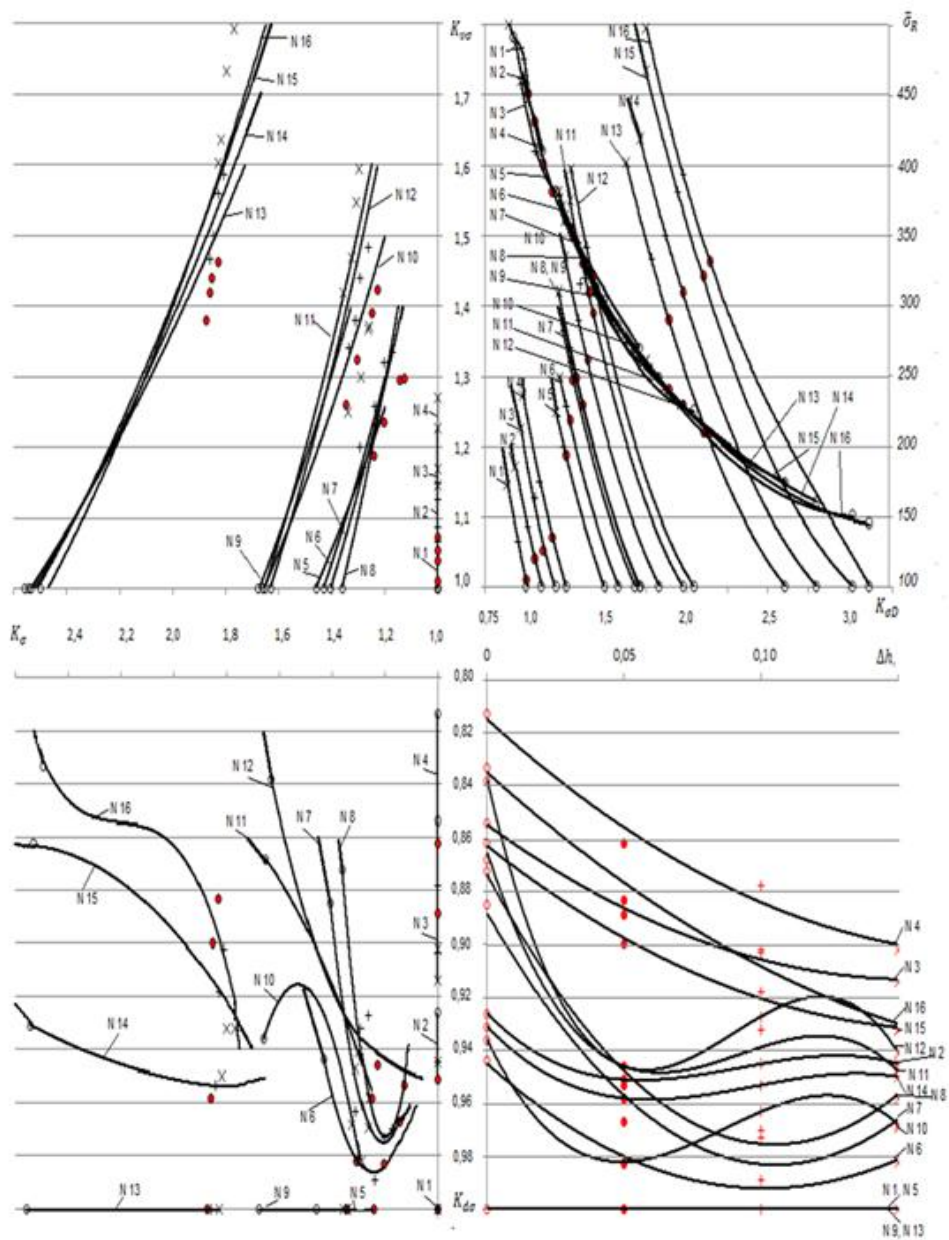


Рис. 3. Номограмма системы уравнений №№1...5 из (4). Обозначения данных: ○, ●, +, × - при  $\Delta h = 0; 0.05; 0.10; 0.15$  мм. Линии №№1...16 в квадрантах I-IV соответствуют функциям:

$$\text{I} - K_{d\sigma} = f_1(\Delta h, d, \bar{\alpha}_\sigma); \text{II} - K_{d\sigma} = F_2(K_\sigma, \Delta h, d, \bar{\alpha}_\sigma); \text{III} - K_{v\sigma} = F_3(K_\sigma, \Delta h, d, \bar{\alpha}_\sigma);$$

$$\text{IV} - K_{v\sigma} = F_4(K_{\sigma D}, \Delta h, d, \bar{\alpha}_\sigma) \text{ и } \bar{\sigma}_{Rv} = F_5(K_{\sigma D}, \Delta h, d, \bar{\alpha}_\sigma)$$

### Основные выводы

1. Выполнен комплексный анализ ранее проведенных исследований, посвященных изучению влияния ППД на показатели усталостной прочности элементов конструкций, 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 40X.

2. 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 определить взаимосвязанные оптимальные значения всего комплекса параметров без выполнения дополнительных испытаний.

3. Для изучения влияния ППД на показатели состояния поверхностных слоев деталей выполнено комплексное исследование для типов деталей, конструкционного материала (сталь 40X) и ППД (обкатка шариковым деформирующим инструментом).

4. 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  $\bar{\sigma}_{R(v)}$  к исходным значениям гладких образцов.

5. Анализ влияния ППД на коэффициенты  $K_{d\sigma}$ ,  $K_{\sigma}$ ,  $K_{v\sigma}$ ,  $K_{\sigma D}$  и  $\bar{\sigma}_{R(v)}$  при различных сочетаниях доминантности параметров  $\Delta h$ ,  $d$  и  $\bar{\alpha}_{\sigma}$ , выдвигаемой требованиями расчетно-технологических и эксплуатационных процедур проектируемой конструкции, показал возможность применения в расчетах ранее неучтенных коэффициентов и  $\bar{\sigma}_{R(v)}$ . Получены сводные номограммы, применением которых решаются задачи выбора оптимальных параметров ППД, уточняются характеристики работоспособности элементов конструкций, достигаются низкие материалоемкость и себестоимость конструкции, которые в заданном сроке службы обеспечат надежную и безопасную работу.

### ЛИТЕРАТУРА

1. G. Besserlich, Untersuchungen zur Eigenspannungs und Verzugsausbildung beim Abschrecken von Yulindern aus den Stählen 42 CrMo 4 und Ck 45 unter Berücksichtigung der Umwandlungsplastizität: Dissertation, University of Karlsruhe, 1993.
2. U. Ahrens, Beanspruchungsabangiges Umwawlungsverhalten und Umwawlunplastiyität niedrig legierter Stähle emit untershiedlich hohen Kohlenstoffgehalten: Dissertation, University of Paderborn, 2003.
3. А.В. Ежелев, И.Н. Бобровский, А.А. Лукьянов, Анализ способов обработки поверхностно-пластическим деформированием, Фундаментальные исследования, 2012, № 6-3, 642-646.

4. В.А. Кирпичев и др., Прогнозирование сопротивления усталости упрочненных деталей с различными концентраторами напряжений, Математическое моделирование и краевые задачи: Тр. V Всеросс. конф. с междунар. уч. Ч.1, Самара, 2008, 143-147.
5. В.Ф. Павлов и др., Остаточные напряжения и пределы выносливости упрочненных деталей с концентраторами при различных видах упрочнения, Надежность и долговечность машин и сооружений: Междунар. науч.-техн. сб.- Киев, 2008, Вып. №30, 108-113.
6. В.Г. Санамян, Упрочнение деталей машин поверхностным пластическим деформированием: Уч. пос., Ростов н/Д: РГУПС, 2003, 64с.
7. В.Ю. Блюменштейн, М.С. Малахов, Влияние режимов на формирование остаточных напряжений в поверхностном слое при размерном совмещенном обкатывании, Обработка металлов, 2008, №2, 15-23.
8. Л.В. Агамиров, А.Н. Лисин, В.В. Мозалев, Прогнозирование сопротивления усталости барабанов авиационных колес, подверженных поверхностному пластическому деформированию, Упрочняющие технологии и покрытия, 2011, №3, 8-15.
9. А.Г. Суслов, Р.В. Гуров, Проектирование операций отделочно-упрочняющей обработки поверхностно-пластическим деформированием, Упрочняющие технологии и покрытия, 2010, №3, 14-17.
10. В.Ф. Губанов и др., Технология обработки обкатываглаживанием, Ремонт, восстановление, модернизация, 2008, №11, 36-38.
11. О.Н. Федонин, С.В. Степашина, Научное обоснование выбора режимов обработки при поверхностном пластическом деформировании, Вестн. БГТУ, 2011, №1, 4-8.
12. Р.В. Гуров, Взаимосвязь режимов обработки и геометрических параметров инструмента с параметрами качества поверхностного слоя при отделочных и отделочно-упрочняющих режимах ОУО ППД, Упрочняющие технологии и покрытия, 2010, №8, 7-10.
13. М.Н. Саушкин и др., Расчетно-экспериментальное исследование устойчивости остаточных напряжений в упрочненном слое цилиндрического изделия к температурным нагрузкам, Вестн. Самар. гос. техн. ун-та, Сер. Физ.-мат. науки, 2009, №1(18), 101-113.
14. H. Luo, J. Liu, L. Wang, O. Zhong, Study of the mechanism of the burnishing process with cylindrical polycrystalline diamond tools, Journ. of Mater. Process. Techn., 2006, Is. 1-3, 9-16.
15. J.D. Landes, Evaluation of the ASTM and ESIS multiple specimen J initiation procedures using the EURO fracture toughness dataset. GKSS 2001/9, 2001, 73p.
16. M. Dalgic, A. Irretier, H-W. Zoch, and G. Lowisch, Transformation plasticity at different phase transformation of a through hardening bearing steel, Int. Journ. Microstruct. Mater. Prop., 2008, 3-1, 49-64.
17. ՀՀ Արտոնագիր, AM 20220021 Ս 08.03.22թ. №756 Ս. Եռակցված խողովակների կցվանքային կարերի վերջնամշակման սարք/ Մ.Գ. Ստակյան, Ն.Վ.Փիրումյան, Հ.Ս.Ղազարյան. ՄԱԴ (2022.01), B23K, 11/00, B21C, 43/00, գրանցված է 16.02.2022թ.
18. ՀՀ Արտոնագիր, AM 20220021 Ս 08.04.22թ. №762 Ս. Խողովակաշարերի կցվանքային եռակցված կարերի ամրության և երկարակեցության

բարձրացման եղանակ/ Մ.Գ. Ստակյան, Ն.Վ.Փիրումյան, Հ.Ս.Ղազարյան.  
ՄԱԴ (2022.01), B23K, 11/00, B21C, 43/00, գրանցված է 16.09.2022թ.

19. Ն.Վ.Փիրումյան, Մ.Ս. Թորոսյան, Մ.Գ. Ստակյան, Մեքենամասերի հոգնածային դիմադրության բարձրացումն ամրացնող տեխնոլոգիաների կիրառումը, ՃՇՀԱՀ Տեղեկագիր, 2019, №1(62), 31-39.
20. В.Р. Гуров, Учет упругого восстановления в процессе отделочно-упрочняющей обработки поверхностно-пластическим деформированием, Упрочняющие технологии и покрытия, 2012, №3, 9-15.
21. М.Г. Стакян, Ш.Дж. Систани, М.С. Торосян, Оценка прочности и долговечности деталей машин при поверхностном пластическом деформировании, Изв. НАН РА и ГИУА, сер. ТН, 2013, т. 66, N-2, 95-112.

#### **Сведения об авторах**

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

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

Поступила в редакцию 02 октября 2025