

Использование параметрических методов статистики при диагностике нефтепромыслового оборудования

О.В. Балина¹, В.В. Насонов¹, Д.В. Балин²

¹Тюменский государственный нефтегазовый университет

²Национальный исследовательский Томский политехнический университет

Аннотация: В работе рассмотрены методы повышения достоверности диагностики и анализа состояния объектов нефтяной и газовой промышленности, основанные на использовании параметрических методов статистики. Рассчитаны средние значения и коэффициенты вариации механических свойств в пределах марки стали, позволяющие рассчитать величины статистически значимых изменений механических характеристик. Получены корреляционные зависимости между твердостью и пределами прочности и текучести при растяжении, позволяющие определять по значению твердости прочностные характеристики с относительной погрешностью 12%. Установлена величина систематической погрешности определения содержания углерода в стали при помощи микронзонда. Использование полученных результатов позволит повысить обоснованность выводов при оценке состояния диагностируемых объектов и определении условий их дальнейшей эксплуатации.

Ключевые слова: диагностика, нефтепромысловое оборудование, параметрическая статистика, дисперсионный анализ, погрешность измерений, механические свойства, микроанализ.

При оценке состояния диагностируемых объектов необходимо определить соответствие – несоответствие контролируемых параметров (твердость, прочность, толщина стенки, хим. состав материала) критериям отбраковки. Учитывая вероятностный характер распределения исследуемых параметров, для выбранного уровня значимости проводится дисперсионный анализ результатов измерений, что позволяет использовать среднее значение и среднеквадратичные отклонения в качестве диагностических признаков. Использование параметрических оценок и моделирования при оценке состояния технических систем повышает достоверность контроля [1-3].

Выполнен дисперсионный анализ механических свойств нормализованных штанг из стали 20Н2М. Источниками изменчивости являются: плавка металла, линия (цех), год выпуска. Установлено, что распределение пределов прочности и текучести описываются усеченными в области минимальных значений нормальными законами [4].

Объем выборки в пределах плавки равен 25 – 30 единиц. Для уровня значимости 0,05 установлено, что для всех механических характеристик (предел прочности σ_b , предел текучести $\sigma_{0,2}$, твердость HV, относительное удлинение δ , сужение ψ и ударная вязкость KCU_{+18}) дисперсии не зависят от номера плавки, а средние значения указанных величин зависят, и их нельзя рассматривать как одну совокупность. Год выпуска и технологическая линия не вносят значимых изменений в средние значения и дисперсии механических свойств.

После объединения результатов испытаний различных плавков по годам получены средние значения и коэффициенты вариации (V) механических свойств в пределах марки стали: σ_b –680 МПа, V=10%; $\sigma_{0,2}$ –480 МПа, V=19%; HV–180, V=20%; δ –25%, V=23%; ψ –65%, V=15%; KCU_{+18} –19 кгм/см², V=30%. Распределение KCU_{+18} усечено слева при 12 кгм/см². Для подтверждения корректности использованной методики статистического анализа проведено сравнение полученных коэффициентов вариации с аналогичными величинами из источников, рекомендованных Государственной службой стандартных справочных данных (ГСС) [5,6] (для стали 15X2МФА: σ_b –V=6,9%, $\sigma_{0,2}$ – V=12,8%, $\sigma_{0,02}$ – V=14,6%; для стали 45: σ_b – V=9,5%, $\sigma_{0,2}$ - V=16%, $\sigma_{0,02}$ – V=16%).

Полученные результаты позволяют рассчитать величины статистически значимых изменений механических характеристик. Например, при использовании данных твердости для контроля эксплуатационных повреждений в штангах изменение HV от 183 до 190 будет значимо при среднеквадратической ошибке - 13,2 и 60 измерениях.

Далее были изучены зависимости между твердостью и показателями прочности при растяжении некоторых сталей. Как правило, в нормативных документах по техническому диагностированию рекомендуется дюрOMETрический метод оценки характеристик прочности материала и

указываются допустимые пределы значений твердости, однако, отсутствуют данные о погрешностях выполнения измерений.

Нами получены корреляционные зависимости между твердостью по Виккерсу и пределами прочности и текучести при растяжении сталей марок 09Г2С, 17ГС и 16ГС (отечественного производства) толщиной до 32 мм для сосудов, работающих под давлением. Измерения твердости производились переносным твердомером УЗИТ – 2М со стандартной пирамидой Виккерса и усилием внедрения индентора порядка 10 Н.

Нами получены уравнения регрессии для определения пределов прочности и текучести (коэффициенты корреляции равны 0,94 и 0,82 для предела прочности и предела текучести соответственно):

$$\sigma_B = 0,335 \text{ HV} + 21,13$$

$$\sigma_T = 0,342 \text{ HV} - 188,$$

где HV – твердость по Виккерсу, МПа; σ_B ; σ_T - пределы прочности и текучести соответственно, МПа.

Полученные зависимости позволяют отбраковывать материал с учетом требований нормативов. При переносе полученных зависимостей на аналогичные стали японского производства обнаружено систематическое занижение предела текучести в 0,85 раза относительно указанных в сертификатах данных.

Погрешность определения механических свойств зависит от качества подготовки поверхности. Необходимо удалить поверхностный слой толщиной $\approx 0,2$ мм и обеспечить шероховатость не более $R_z 40$. Например, при 120 измерениях распределение данных близко к нормальному, среднее значение твердости равно 137,8, а среднеквадратическое отклонение – 13,7. Относительная погрешность определения предела прочности при HV 140 равна $\pm 4\%$ за счет погрешности нахождения средней линии регрессии и \pm

12% за счет разброса экспериментальных данных, использованных для получения уравнения регрессии.

При использовании уравнения регрессии, полученных на других марках сталей (проанализировано 9 зависимостей) относительная погрешность при HV 140 достигает $\pm 25\%$.

Полученные результаты показывают, что при определении механических свойств дюрометрическим методом необходима количественная оценка возможных погрешностей измерений и использование корреляционных зависимостей для определенного состава и структуры сталей.

При исследовании структуры и свойств сталей без повреждения диагностируемых объектов используются микрообразцы. В работе [7] приведены сведения о диффузии легирующих элементов под влиянием различных факторов. Наиболее сложным является измерение содержания углерода [8-10] с использованием микрозонда, т.к. из-за химических реакций неустойчивых гидрокарбонатов под действием пучка электронов происходит углеродное загрязнение поверхности.

В ходе проведения работ выявлены факторы, влияющие на чувствительность и точность микроанализа, определены оптимальные для выбранных образцов режимы растрового электронного микроскопа (РЭМ) и условия исследования. Установлено, что при площади сканирования от 3 x 3 до 20 x 20 мкм и ускоряющем напряжении 10 – 15 кВ погрешность измерения минимальна. Должны быть соблюдены одинаковые условия процедуры подготовки поверхности, геометрическое положение относительно датчика калибровочных и исследуемых образцов.

Исследованы образцы: армко-железо, отожженная сталь 15 (зерна феррита, перлита (рис. 1), закаленная сталь 40, закаленная сталь 12X18H10T и сталь 15X11МФ после закалки и низкого отпуска. Среднее содержание

легирующего элемента (x_{cp}), среднее квадратическое отклонение (s), количество измерений (n) приведены в таблице 1.

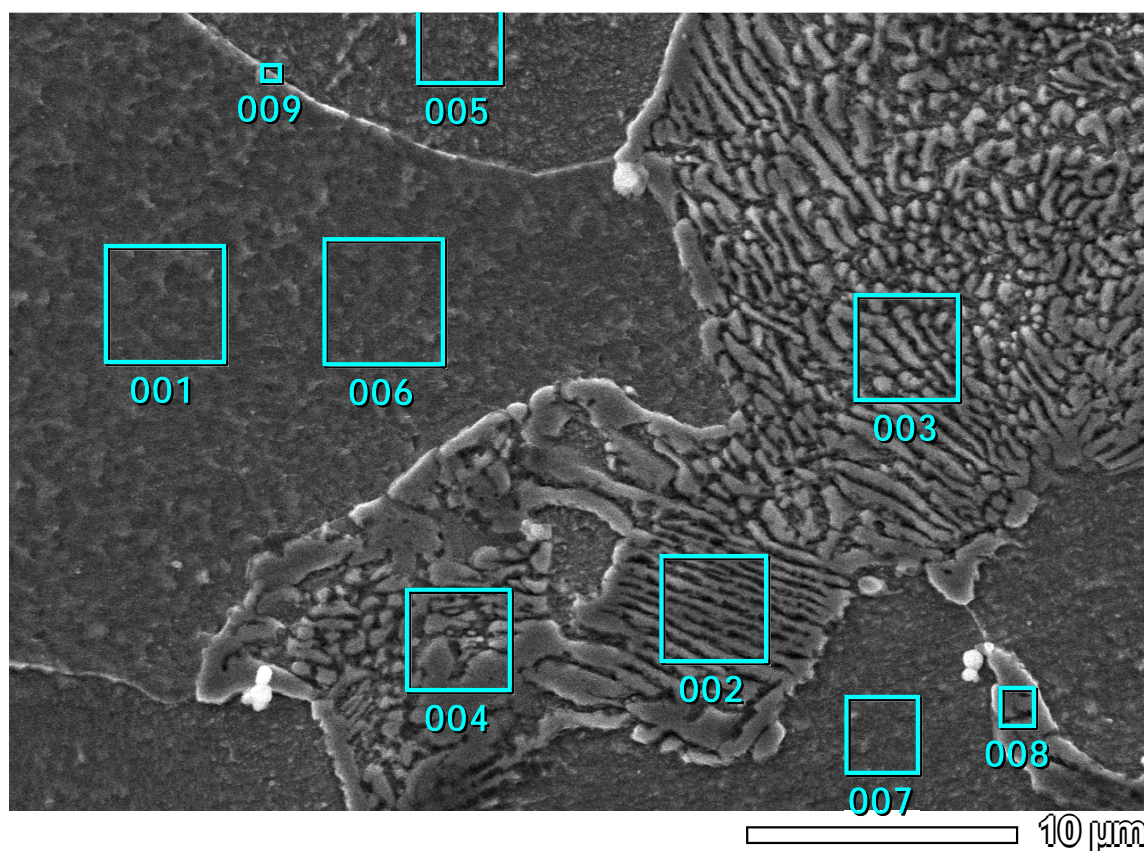


Рис. 1. - Микроанализ (РЭМ) стали 15 в отожженном состоянии:

(001, 005, 006, 007 – феррит; 002, 003, 004, 008 – перлит)

По результатам дисперсионного анализа определения содержания углерода была определена систематическая погрешность для выборки более 100 единиц различных марок сталей.

Приняв систематическую погрешность содержания углерода 1,78% , получаем содержание углерода: сталь 40 – 0,34%; 12X18H10T – 0,08%; 15X11MФ – 0,17%, что совпадает с марочным содержанием углерода в данных сталях. Концентрация остальных легирующих элементов также соответствует марочному составу сталей.

Применение статистических методов обработки данных позволяет аккумулировать информацию о свойствах диагностируемых объектов на

различных этапах эксплуатации, что значительно повышает достоверность оценки их состояния.

Таблица № 1

Результаты рентгеновского микроанализа

Образец	Легирующие элементы, % масс				
	C	Si	Cr	Ni	Mo
армко-железо	$x_{cp}=1,84$ $s=0,29$ $n=14$	-	-	-	-
Сталь 15, отж. (феррит)	$x_{cp}=1,72$ $s=0,17$ $n=6$	-	-	-	-
Сталь 15, отж. (перлит)	$x_{cp}=6,48$ $s=0,27$ $n=6$	-	-	-	-
Сталь 40, зак.	$x_{cp}=2,12$ $s=0,26$ $n=14$	-	-	-	-
12X18H10T, зак.	$X_{cp}=1,86$ $s=0,25$ $n=8$	$x_{cp}=0,68$ $s=0,15$ $n=8$	$x_{cp}=18,96$ $s=0,35$ $n=8$	$x_{cp}=10,8$ $s=0,46$ $n=8$	-
15X11MФ, зак., отп.	$x_{cp}=1,95$ $s=0,44$ $n=38$	-	$x_{cp}=11,12$ $s=0,53$ $n=38$		$x_{cp}=0,7$ $s=0,29$ $n=38$

Литература

1. Лобач И.А. Проведение внутритрубной диагностики промышленного конденсатопровода в условиях отсутствия основного перекачиваемого продукта // Инженерный вестник Дона, 2014, №2 URL: ivdon.ru/magazine/archive/n2y2014/2449.

2. Клевцов С.И., Клевцова А.Б., Буринов С.В. Модель параметрической качественной иерархической оценки состояния технической системы // Инженерный вестник Дона, 2015, №3 URL: ivdon.ru/magazine/archive/n3y2015/3088.



3. Балина О.В., Нассонов В.В., Нассонова Л.Н. Экспертиза технических устройств: методы диагностики и анализа состояния трубопроводов // Научно-технический вестник Поволжья, 2014. №5. С. 112-115.

4. Степнов М.Н. Статистические методы обработки результатов механических испытаний. Справочник. М.: Машиностроение, 1985. 231 с.

5. Статистические закономерности малоциклового разрушения: Справочник / Под общ. ред. Н.А. Махутова, А.Н. Романова. М.: Наука, 1989. 252 с.

6. Ашкенази Е.К., Ганов Э.В. Анизотропия конструкционных материалов. Справочник. Л.: Машиностроение, 1972. 246 с.

7. Терентьев В.Ф. Усталостная прочность металлов и сплавов. М.: Интермет Инжиниринг, 2002. 288 с.

8. Brandon D., Kaplan W.D. Microstructural characterization of materials. 2nd edition. Chichester: John Wiley & Sons Ltd., 2008. 536 p.

9. Goldstein J.I., Yakowitz H. Practical scanning electron microscopy. New York: Plenum Press, 1975. 582 p.

10. Goldstein J.I., Newbury D.E., Echlin P., Joy D.C., Lyman C.E., Lifshin E., Sawyer L., Michael J.R. Scanning electron microscopy and X-ray microanalysis. Third edition. New York: Kluwer Academic/Plenum Publishers, 2003. 689 p.

References

1. Lobach I.A. Inženernyj vestnik Dona (Rus), 2014, №2 URL: ivdon.ru/magazine/archive/n2y2014/2449.

2. Klevtsov S.I., Klevtsova A.B. Inženernyj vestnik Dona (Rus), 2015, №3 URL: ivdon.ru/magazine/archive/n3y2015/3088.

3. Balina O.V., Nasonov V.V., Nasonova L.N. Nauchno-tehnicheskij vestnik Povolzh'ja, 2014. №5. pp. 112-115.



4. Stepnov M.N. Statisticheskie metody obrabotki rezultatov mechanicheskikh ispytaniy. Spravochnik. [Statistical methods of the mechanical tests results processing. Reference book.] M.: Mashinostroenie, 1985. 231 p.

5. Statisticheskie zakonomernosti malotsiklovogo razrusheniya: Spravochnik. Pod obsch. red. N.A. Mahutova, A.N. Romanova. [Statistical regularities of the low-cycle failure. Reference book. Edited by N.A. Mahutova, A.N. Romanova.] M.: Nauka, 1989. 252 p.

6. Ashkenazi E.K., Ganov E.V. Anizotropiya konstruktsionnyh materialov. Spravochnik. [Construction materials anisotropy. Reference book.] L.: Mashinostroenie, 1972. 246 p.

7. Terentev V.F. Ustalostnaya prochnost metallov i splavov. [Fatigue strength of metals and alloys.] M.: Internet Inzhiniring, 2002. 288 p.

8. Brandon D., Kaplan W.D. Microstructural characterization of materials. 2nd edition. Chichester: John Wiley & Sons Ltd., 2008. 536 p.

9. Goldstein J.I., Yakowitz H. Practical scanning electron microscopy. New York: Plenum Press, 1975. 582 p.

10. Goldstein J.I., Newbury D.E., Echlin P., Joy D.C., Lyman C.E., Lifshin E., Sawyer L., Michael J.R. Scanning electron microscopy and X-ray microanalysis. Third edition. New York: Kluwer Academic/Plenum Publishers, 2003. 689 p.