

## Контроль качества деталей сельскохозяйственных машин динамическими неразрушающими методами

*А.Н. Бескопильный, Е.М. Зубрилина, А.Д. Чистяков, Л.М. Грошев,  
Г.А. Кузин, Ю.А. Царев*

*Донской государственный технический университет, Ростов-на-Дону*

**Аннотация:** Рассмотрена проблема контроля прочностных характеристик деталей сельскохозяйственных машин динамическими неразрушающими методами ударного вдавливания инденторов конической формы. Качество важнейших деталей рассматривается с точки зрения совокупности механических характеристик, определяющих прочность, твердость, износостойкость и деформируемость. Эти характеристики должны быть известны и иметь возможность оперативно и точно контролировать все детали как в процессе производства, так и в процессе эксплуатации. Механические характеристики металлов имеют стохастический характер. Для этого было разработано устройство для ударного вдавливания и разработан метод, основанный на вероятностных законах дисперсии механических характеристик.

**Ключевые слова:** сельскохозяйственные машины, надежность, контроль качества, механические характеристики, закон Вейбулла, неразрушающий контроль, ударное индентирование.

Улучшение контроля качества является очень важной и широко распространенной проблемой, касающейся большой области производства, особенно для нестабильной производственной системы, которая приводит как к снижению надежности, так и снижению качества. В [1] контроль качества осуществляется 100% проверкой для определения в данной выборке доли бракованных. Основанный на обратной связи информации о качестве, оптимальное действие проводится, как только пропорция достигает заданного порогового значения во время производственных циклов на основе стохастической математической модели.

Определение основных механических свойств деталей и элементов сельскохозяйственных машин является одной из важнейших задач совершенствования техники на любом этапе ее жизненного цикла. При проектировании необходимо знать наиболее важные механические свойства,

такие как предел текучести, предел прочности при растяжении, относительное удлинение и твердость [2,3], которые определяют прочность, износостойкость и деформируемость наиболее ответственных деталей. В последние годы методы неразрушающего контроля, основанные на контактной механике [4,5], получили широкое распространение в управлении качеством в машиностроении, гражданском строительстве [6,7,8] и металлургии. Многие исследования показывают возможность оценки параметров ползучести [9] материалов, усталости [10] и остаточных свойств при сварке [11].

Модель контроля качества, которая изучается в [12], основана на теории принципала-агента, и учитывает потерю репутации из-за некачественной продукции и идентификации степени внешней ответственности. После анализа модели и проверки в условиях имитационного моделирования результаты показывают, что оптимальный уровень контроля качества и рыночной цены сельскохозяйственной продукции может быть достигнут в цепочке поставок сельскохозяйственной продукции на основе «Интернет +» тогда и только тогда, когда претензия информационной платформы к сельскохозяйственному производителю меньше, чем требование производителя сельскохозяйственной продукции к поставщику услуг доставки.

Информационное моделирование цепочки поставок построено в [13] для информации о качестве, включая информацию об окружающей среде, процедуры обработки и оценки качества продукции, основанные на принципе факторов безопасности качества.

Алгоритмы контроля качества материала деталей машин должны основываться на измерении набора механических характеристик, таких как предел текучести и предел прочности, твердость и относительное удлинение. Стохастический характер свойств сталей приводит к необходимости

---

изучения законов распределения механических характеристик и построения плана измерений для правильного описания вероятностных параметров.

Мы рассматриваем широкий спектр материалов стальных деталей сельскохозяйственных машин с пределом текучести  $\sigma_T$ , пределом прочности  $\sigma_B$ , твердостью HV и удлинением  $\delta$ . Эти механические характеристики являются случайными величинами.

Рассмотрим пример построения вероятностной модели предела текучести и алгоритма оценки параметров распределения. Случайная величина  $\Theta$ , характеризующая прочность металла (предел текучести, предел прочности и т. д.). Чтобы определить тип закона распределения случайной величины  $F(x) = P\{\Theta \leq x\}$ , рассмотрим подход, основанный на преобразовании случайных величин.

Как известно, кривая напряжения-деформация при одноосном растяжении удовлетворительно аппроксимируется степенной функцией. Выберем участок этой кривой на интервале  $\sigma \in [\sigma_0; \sigma_B]$ :

$$\sigma = \sigma_0 + A_0 \varepsilon^m, \quad (1)$$

где  $\sigma_0, A_0, m$  – параметры кривой напряжение-деформация стали.

Первая производная определяется по формуле (2):

$$\varepsilon'(\sigma) = B_1 (\sigma - \sigma_0)^\gamma \quad (2)$$

где  $B_1 = (m A_0^{1/m})^{-1}, \gamma = m^{-1} - 1$ .

Введем новую переменную  $U = U(\sigma)$ , которая определяет накопление пластической деформации:

$$u = \int_{\sigma_0}^{\sigma} \varepsilon'(z) dz = B_0 (\sigma - \sigma_0)^{\gamma+1} \quad (3)$$

Для этой новой переменной справедливо выражение:

$$P\{\Theta \leq x\} = P\left\{U \leq \int_{\sigma_0}^x \varepsilon'(z) dz\right\} \quad (4)$$

Если переменная  $U$  имеет распределение плотности  $f_1(u)$ , то ее закон распределения:

$$P\{U \leq u\} = F(u) = \int_0^u f_1(x) dx \quad (5)$$

Рассмотрим функцию  $f_1(u) \cong \exp(-u)$ , тогда закон распределения:

$$G(x) = F\left[B_0(x - \sigma_0)^{\gamma+1}\right] = \int_0^{B_0(x - \sigma_0)^{\gamma+1}} \exp(-u) du = 1 - \exp\left[-B_0(x - \sigma_0)^{\gamma+1}\right] \quad (6)$$

Полученное распределение известно в литературе как трехпараметрический закон Вейбулла, общий вид которого:

$$F(x) = 1 - \exp\left[-\left(\frac{x - \mu}{\beta}\right)^k\right] \quad (7)$$

где  $\mu$ ,  $\beta$ ,  $k$  – соответственно параметры сдвига, масштаба и формы.

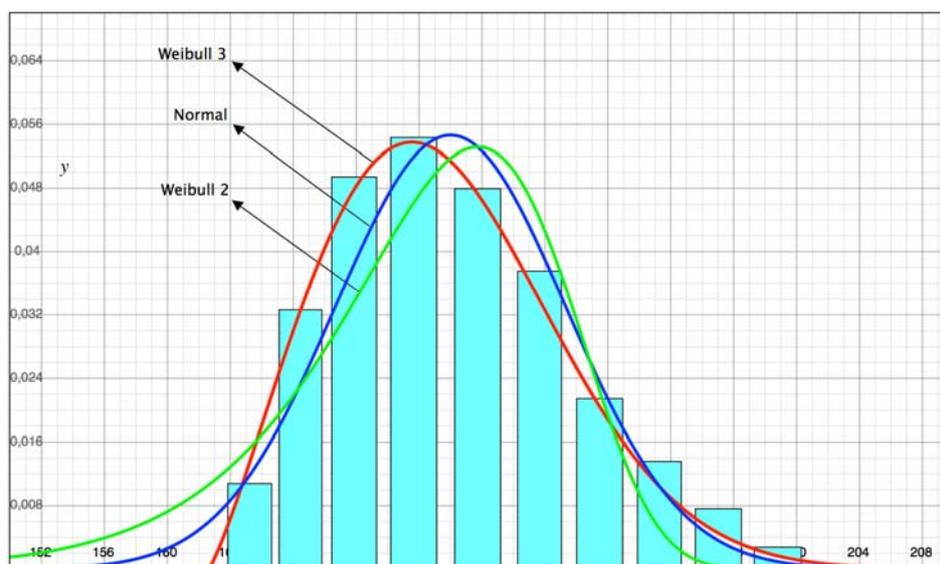


Рис.1 - Гистограмма и плотности распределения вероятностей  $\sigma_T$  при аппроксимации законами Вейбулла с 2 параметрами, 3 параметрами и нормальным распределением

Согласно рис. 1, закон Вейбулла с 3 параметрами наилучшим образом описывает распределение предела текучести стали.

Рассмотрим взаимосвязь между напряжениями и деформациями в виде зависимости, предложенной Е. Воусом, которую в упрощенном виде запишем:

$$\sigma = \sigma_0 + A_0 \exp(\varepsilon) \quad (8)$$

Если из всего класса экспоненциальных распределений переменная  $U$  описывается нормальным законом с плотностью:

$$f_1(u) = (2\pi a^2)^{-1/2} \exp\left[-\frac{u^2}{2a^2}\right] \quad (9)$$

где  $a$  - параметр, характеризующий дисперсию значений  $U$ .

Тогда закон распределения прочности при растяжении:

$$G(x) = P\{\Theta \leq x\} = \int_0^{\ln(x-\sigma_0)-A_1} f_1(z) dz = \Phi\left[\frac{\ln(x-\sigma_0)-A_1}{a}\right] \quad (10)$$

где  $\Phi(\cdot)$  – функция Лапласа.

Полученное распределение является логарифмически-нормальным со сдвигом, общий вид которого:

$$F(x) = \frac{1}{a\sqrt{2\pi}} \int_{\mu}^x (\tau - \mu)^{-1} \exp\left\{-\frac{[\ln(\tau - \mu) - b]^2}{2a^2}\right\} d\tau \quad (11)$$

где  $\mu$ ,  $a$ ,  $b$  – параметры 3-параметрического логарифмически нормального закона.

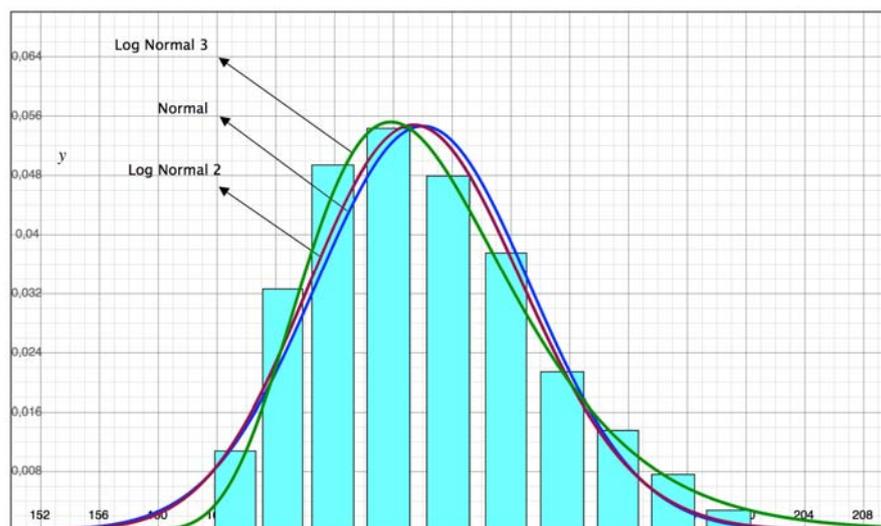


Рис.2 - Гистограмма и плотности распределения вероятностей  $\sigma_T$  при аппроксимации законами Логнормальным с 2 параметрами, 3 параметрами и нормальным распределением.

Из рис. 2 следует, что логнормальный закон с 3 параметрами наилучшим образом описывает распределение предела текучести стали.

Параметр сдвига в этих выражениях является наиболее важной характеристикой, поскольку он показывает минимальное значение прочности. Этот параметр необходимо измерять и, следовательно, по этому параметру оценивать прочность, как один из элементов качества деталей.

В процессе изготовления элементы машин обрабатываются сложными видами термической, механической, химической или другой энергии, после чего свойства материала изменяются. Теоретические и экспериментальные исследования позволили разработать прибор для определения механических свойств сталей (рис. 3), который состоит из ручки 1, пружины 2, фиксатора 3, корпуса 4, держателя индентора 5, датчиков 6 и 9, кузовная часть 7, амортизатор 8.

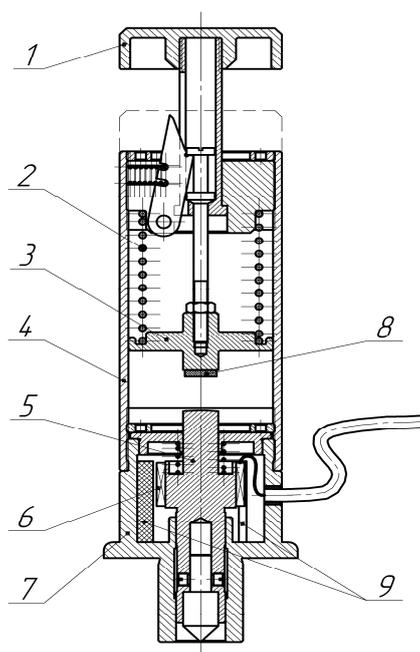


Рис.3 – Схема прибора для определения механических характеристик сталей

Во время измерения ударник 3 ударяет по держателю индентора 5, а датчик 6 регистрирует сигнал скорости  $V(t)$ . Зависимости  $S(t)$  и  $W(t)$  получаются интегрированием и дифференцированием.

Многочисленные экспериментальные исследования показали, что с точностью до 7% мы можем определить сложные механические характеристики материалов, как в процессе производства, так и в процессе эксплуатации.

Для практической сертификации конструкционных сталей на соответствие механических свойств требованиям нормативных документов, с учетом погрешности их статистической оценки должны быть выполнены следующие работы. Для каждой марки стали, используемой заводом для изготовления деталей машин, из журнала механических испытаний должна быть извлечена репрезентативная выборка основных прочностных характеристик: предела прочности при растяжении, предела текучести, относительного удлинения и твердости в течение определенного

предварительно принятого периода времени. Используя специальную программу, основанную на алгоритмах статистического оценивания методом максимального правдоподобия, проверяется гипотеза о соответствии этих выборок законам Вейбулла и логнормальной с параметром сдвига. Если гипотеза о соответствии экспериментальных данных теоретической кривой верна одновременно для двух законов, то предпочтение следует отдавать закону с минимальным значением критерия фон Мизеса или закону Вейбулла, если значение критерия приблизительно совпадает. Такие работы проводятся примерно раз в год, либо при внесении изменений в техпроцесс производства.

Для каждой марки стали, используя специальную программу, основанную на алгоритмах статистического моделирования, с учетом информации о параметрах распределения, для объемов  $n = 2, 5, 10, 15$  элементов определяют средние погрешности минимального механического свойства для всех прочностных характеристик. По величине этих ошибок для контроля качества и сертификации выбирается рациональный размер выборки. Этот размер выборки будет соответствовать конкретной средней ошибке минимальной оценки свойства, которая указана в сертификате. По мере накопления данных о сертификационных испытаниях исходная информация, используемая в качестве априорных данных, обновляется и процедура контроля повторяется.

Результаты также показывают, что сертификационные требования должны отличаться в зависимости от назначения стали. Например, для стали 17ГСУ, работающей в условиях удара, предпочтительно ужесточить требования к сертификации ударной вязкости и ограничить объем до  $n = 3 \dots 5$  образцов с погрешностью  $\varepsilon_{\mu} < 5\%$ . В этих условиях для стали 40 размер выборки  $n = 5$  недостаточен и должен увеличиться.

---

На основе проведённых численных исследований можно сделать следующие выводы.

Существующие методы контроля качества и сертификации конструкционных сталей, используемых при производстве сельскохозяйственных машин, основаны на испытании одного или двух образцов из партии в несколько сотен тонн готовой продукции, что приводит к значительным ошибкам в определении механических свойств. Для повышения точности предлагаемого способа используется информация о свойствах контролируемого материала на основе теории экстремальных условий отбора проб.

Одним из важнейших показателей качества конструкционных сталей является минимальное значение механических свойств, таких как предел текучести и предел прочности, относительное удлинение, твердость, которые выражаются параметром сдвига в вероятностных законах Вейбулла и логнормальных. Статистические процедуры, основанные на теории экстремальных членов выборки, предложены для эффективной оценки этого параметра для малых выборок.

Предложенный подход апробирован на различных стальных элементах машин и конструкций [14,15] и показал свою эффективность.

### Литература

1. Guo Qing Cheng, Bing Hai Zhou, Ling Li, Reliability Engineering & System Safety, V.175, 2018, pp.251-264.
2. Beskopylny A., Veremeenko A., Kadomtseva E., Beskopylnaia N., MATEC Web of Conferences V.129, 2017, p.02046.
3. Beskopylny A., Veremeenko A., Yazyev B., MATEC Web of Conferences V.106, 2017, p.04004.



4. Naumkina J.V., Pronozin Y.A., Epifantseva L.R., Magazine of Civil Engineering, V.6, 2016, pp.23-34.
  5. Jianjun Wu, Mingzhi Wang, Yu Hui, Zengkun, Zhang, He Fan Materials Science and Engineering: A, 723, 2018, pp.269-278.
  6. Beskopylny A., Lyapin A., Andreev V., MATEC Web of Conferences V.117, 2017, p.00018.
  7. Beskopylny A., Lyapin A., Kadomtsev M., Veremeenko A., Web of Conferences V.146, 2018, p.02013.
  8. Ma Li, Low Samuel, Song John, Mechanics of Materials 69, 2014, pp.213–226.
  9. Litvinov S., Beskopylny A., Trush L., Yazyev S., MATEC Web of Conferences V.106, 2017, p.04013.
  10. Beskopylny A., Onishkov N., Korotkin V., Advances in Intelligent Systems and Computing, V.692 2017, pp.184-191.
  11. Belen'kii D., Beskopyl'nyi A., Vernezi N., Shamraev L., Welding International, V.11 8, 1997, pp.642-645.
  12. Qiang Shen, Jian Zhang, Yun-xian Hou, Jia-hui Yu, Jin-you Hu, Information Processing in Agriculture, V.5, 2018 In press.
  13. Lu Liu, Xinlei Liu, Guangchen Liu, Information Processing in Agriculture, V.5, 2018, pp.47-59.
  14. Бескопыльный А.Н., Веремеенко А.А., Копылов Ф.С., Крымский В.С. Задача о статическом внедрении конического индентора в область с поверхностным упрочнением // Инженерный вестник Дона, 2018, №2 URL: [ivdon.ru/ru/magazine/archive/N2y2018/4720](http://ivdon.ru/ru/magazine/archive/N2y2018/4720).
  15. Кадомцева Е.Э., Бескопыльный А.Н., Бердник Я.А. Расчёт на жёсткость пластины, подкреплённой рёбрами, на упругом основании методом Бубнова-Галёркина // Инженерный вестник Дона, 2016, №3 URL: [ivdon.ru/ru/magazine/archive/n3y2016/3699](http://ivdon.ru/ru/magazine/archive/n3y2016/3699).
-

## References

1. Guo Qing Cheng, Bing Hai Zhou, Ling Li, Reliability Engineering & System Safety, V.175, 2018, pp.251-264.
  2. Beskopylny A., Veremeenko A., Kadomtseva E., Beskopylnaia N., MATEC Web of Conferences V.129, 2017, p.02046.
  3. Beskopylny A., Veremeenko A., Yazyev B., MATEC Web of Conferences V.106, 2017, p.04004.
  4. Naumkina J.V., Pronozin Y.A., Epifantseva L.R., Magazine of Civil Engineering, V.6, 2016, pp.23-34.
  5. Jianjun Wu, Mingzhi Wang, Yu Hui, Zengkun, Zhang, He Fan Materials Science and Engineering: A, 723, 2018, pp.269-278.
  6. Beskopylny A., Lyapin A., Andreev V., MATEC Web of Conferences V.117, 2017, p.00018.
  7. Beskopylny A., Lyapin A., Kadomtsev M., Veremeenko A., Web of Conferences V.146, 2018, p.02013.
  8. Ma Li, Low Samuel, Song John, Mechanics of Materials 69, 2014, pp.213–226.
  9. Litvinov S., Beskopylny A., Trush L., Yazyev S., MATEC Web of Conferences V.106, 2017, p.04013.
  10. Beskopylny A., Onishkov N., Korotkin V., Advances in Intelligent Systems and Computing, V.692 2017, pp.184-191.
  11. Belen'kii D., Beskopyl'nyi A., Vernezi N., Shamraev L., Welding International, V.11 8, 1997, pp.642-645.
  12. Qiang Shen, Jian Zhang, Yun-xian Hou, Jia-hui Yu, Jin-you Hu, Information Processing in Agriculture, 2018, V.5, In press.
  13. Lu Liu, Xinlei Liu, Guangchen Liu, Information Processing in Agriculture, V.5, 2018, pp.47-59.
-



14. Beskopylnyy A.N., Veremeenko A.A., Kopylov F.S., Krymskyy V.S. Inzhenernyj vestnik Dona (Rus), 2018, №2. URL: [ivdon.ru/ru/magazine/archive/N2y2018/4720](http://ivdon.ru/ru/magazine/archive/N2y2018/4720).
15. Kadomtseva E.E., Beskopylnyy A.N., Berdnik Ya.A. 2016, №3. URL: [ivdon.ru/ru/magazine/archive/n3y2016/3699](http://ivdon.ru/ru/magazine/archive/n3y2016/3699).