

УДК 621-192.38

DOI: 10.17816/0321-4443-100404

Оригинальное исследование



# Прогнозирование ресурса консольно-закрепленных деталей при износе с учетом допускаемых напряжений

А.М. Михальченков<sup>1</sup>, В.Ф. Комогорцев<sup>1</sup>, И.В. Козарез<sup>1</sup>, А.В. Дьяченко<sup>1</sup>, М.А. Михальченкова<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Брянский государственный аграрный университет, Брянск, Россия;

<sup>2</sup> Брянский институт управления и бизнеса, Брянск, Россия

**Обоснование.** Нередко детали рабочих органов машин, эксплуатирующихся в абразивных средах имеют консольное крепление. Вследствие изнашивания утрачиваются их размеры, оговоренные техническими условиями, и происходит разрушение. Ресурс этих изделий определяется допускаемыми изгибными напряжениями с учетом интенсивности их изнашивания. Существующие теоретические методы прогнозирования времени работы детали до ее предельного состояния при решении задач не учитывают критериев прочности и изнашивания в комплексе.

**Цель работы** заключается в получении математического выражения, определяющего ресурс детали при ее износе с учетом допускаемых напряжений.

**Материалы и методы.** Раскрытие цели проводилось путем решения задачи прогнозирования ресурса консольно-закрепленного с использованием классического курса сопротивления материалов, элементов теории упругости и основ триботехники.

**Результаты.** В результате математических изысканий и с учетом практических знаний получена формула для определения ресурса детали, которая учитывает размеры детали, величину допускаемых напряжений, коэффициент, регламентирующий стойкость материала к изнашиванию, давление на рабочую поверхность, давление в месте защемления и давления на свободном конце бруса. Установлены условия, определяемые двумя неравенствами, при соблюдении которых деталь будет работоспособна.

**Заключение.** Получены математические выражения, позволяющие проводить прогнозирование, и определены условия работоспособности консольно-закрепленных деталей в процессе их изнашивания по допускаемым напряжениям.

**Ключевые слова:** консольно-закрепленные детали; изнашивание; допустимые напряжения; прогнозирование; ресурс; условия работоспособности; стойкость к изнашиванию

## Для цитирования:

Михальченков А.М., Комогорцев В.Ф., Козарез И.В., Дьяченко А.В., Михальченкова М.А. Прогнозирование ресурса консольно-закрепленных деталей при износе с учетом допускаемых напряжений // *Тракторы и сельхозмашины*. 2022. Т. 89, № 1. С. 67–72. DOI: 10.17816/0321-4443-100404

DOI: 10.17816/0321-4443-100404

Original study

# Forecasting the resource of console-fixed parts during wear with account of permissible stresses

Alexander M. Mikhalechikov<sup>1</sup>, Vladimir F. Komogortsev<sup>1</sup>, Irina V. Kozarez<sup>1</sup>,  
Anton V. Dyachenko<sup>1</sup>, Marina A. Mikhalechkova<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Bryansk State Agrarian University, Bryansk, Russia

<sup>2</sup> Bryansk Institute of Management and Business, Bryansk, Russia

**BACKGROUND:** Often, parts of the working bodies of machines operating in abrasive environments have a cantilever mount. Due to wear, their dimensions are lost, specified by the technical conditions, and destruction occurs. The resource of these products is determined by the allowable bending stresses, taking into account the intensity of their wear. The existing theoretical methods for predicting the operating time of a part to its limiting state when solving problems do not take into account the criteria of strength and wear in the complex.

**AIMS:** The aim consists in obtaining a mathematical expression that determines the resource of the part when it is worn, taking into account the allowable stresses.

**METHODS:** The disclosure of the goal was carried out by solving the problem of predicting the resource of a cantilever-fixed using the classical course of the resistance of materials, elements of the theory of elasticity and the basics of tribotechnics.

**RESULTS:** As a result of mathematical research and based on practical knowledge, a formula was obtained for determining the resource of a part, which takes into account the dimensions of the part, the magnitude of the allowable stresses, the coefficient regulating the resistance of the material to wear, the pressure on the working surface, the pressure at the pinch point and the pressure at the free end timber. The conditions determined by two inequalities are established under which the part will be operable.

**CONCLUSION:** Mathematical expressions have been obtained that make it possible to predict and the conditions for the performance of cantilever-fixed parts in the process of their wear according to allowable stresses have been determined.

**Keywords:** *cantilevered parts; wear; permissible stresses; prediction; resource; working conditions; wear resistance*

## Cite as:

Mikhalechikov AM, Komogortsev VF, Kozarez IV, Dyachenko AV, Mikhalechkova MA. Forecasting the resource of console-fixed parts during wear with account of permissible stresses. *Tractors and Agricultural Machinery*. 2022;89(1):67–72. DOI: 10.17816/0321-4443-100404

Received: 09.02.2022

Accepted: 23.02.2022

Published: 15.03.2022

## ВВЕДЕНИЕ

Ряд деталей рабочих органов технических средств, предназначенных для эксплуатации в абразивных средах (металлургическое производство, грунто- и почвообрабатывающая техника) [1, 2, 3] имеют консольное крепление, например, зубья ковшей экскаваторов, ножи скоростных плугов, долота глубокорыхлителей [4, 5]. В процессе их использования вследствие изнашивания утрачиваются нормативные размеры и нередко происходит излом, что приводит к остановке агрегата, т. е. в данном случае ресурс таких конструктивных элементов во многом определяется допускаемыми в них изгибными напряжениями с учетом интенсивности их изнашивания. Однако существующие теоретические методы прогнозирования времени работы детали до ее предельного работоспособного состояния при решении подобных задач не учитывают параметров прочности и факторов процесса изнашивания в комплексе.

## ЦЕЛЬ ИССЛЕДОВАНИЯ

Цель исследования заключается в получении математического выражения, определяющего ресурс детали при ее износе с учетом допускаемых напряжений.

## РЕШЕНИЕ ЗАДАЧИ

За расчетную схему принимается балка (брус) длиной  $l$ , защемленная на одном из своих концов и свободная на другом (балка – консоль) – (рис. 1, а).

К балке приложена произвольная нагрузка  $q = q(x)$  ( $0 \leq x \leq l$ ), представляющая собой силу, отнесенную к единице длины балки (ее размерность  $H/m$ ). Сечение балки в любом ее сечении представляет собой прямоугольник шириной  $b$  и высотой  $h$  (рис. 1, б), что соответствует геометрии реальных деталей. Если  $p(x)$  ( $H/m^2$ ) – давление на поверхность балки, к которой приложена нагрузка  $q(x)$ , то

$$q(x) = b \cdot p(x) \quad (0 \leq x \leq l).$$

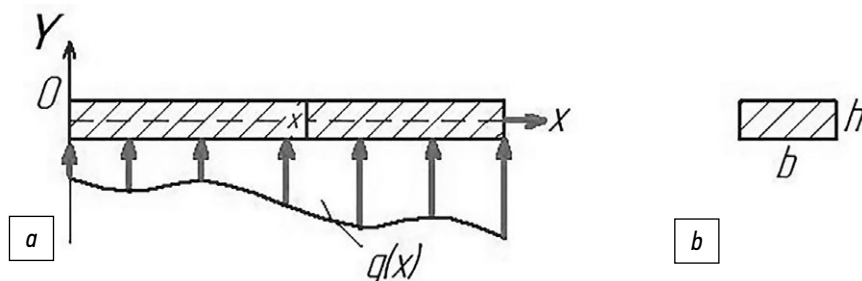


Рис 1. Расчетная схема (а) и профиль поперечного сечения (б).

Fig 1. Design scheme (a) and cross-sectional profile (b).

Схема, изображенная на рис. 1, предполагает неравномерность давления  $p(x)$  на брус по его длине. Значит, и износ бруса (изменение его толщины  $h$ ) может быть неравномерным: где больше давление, там больше износ.

Полагая, что износ бруса в любом его сечении  $x$  пропорционален давлению  $p(x)$  в этом сечении, получим следующее выражение для интенсивности  $c$  изнашивания бруса:

$$c = k \cdot p(x) \quad (м/с) \quad (0 \leq x \leq l).$$

Здесь  $k$  – коэффициент пропорциональности, регламентируемый износостойкостью материала бруса. Он определялся опытным путем или использованием суммы накопленных на практике данных.

Если  $h_0$  – первоначальная толщина бруса (в момент времени  $t = 0$ ), то его толщина  $h$  в произвольный момент времени  $t > 0$  будет выражаться формулой:

$$h = h(x; t) = h_0 - ct = h_0 - k \cdot p(x) \cdot t \quad (t \geq 0; 0 \leq x \leq l). \quad (1)$$

Естественно, имеет смысл рассматривать лишь те значения времени  $t$ , при которых  $h > 0$  в любом сечении бруса:

$$\begin{aligned} h_{\min} > 0 &\Rightarrow h_0 - k \cdot [p(x)]_{\max} \cdot t > 0 \Rightarrow \\ &\Rightarrow 0 \leq t < \frac{h_0}{k \cdot [p(x)]_{\max}}. \end{aligned} \quad (2)$$

Ширину бруса  $b$  полагаем постоянной по времени (т. к. изнашивание бруса будет, очевидно, происходить лишь по его толщине). Износ же по ширине если и будет присутствовать, то его величина столь мала, что ею можно пренебречь. Следует отметить, что изгибные напряжения, возникающие в любом его сечении  $x$  не зависят от ширины бруса. Это связано с тем, что при изменении ширины бруса  $b$  пропорционально этому изменению будет меняться и нагрузка  $q(x) = b \cdot p(x)$  на консоль по ее длине. Кроме того, практический опыт использования деталей консольного

крепления показал на малозначительный износ по их ширине [6]. Как показано ниже, ширина  $b$  бруса в итоговых формулах не фигурирует.

Будем далее считать, что нагрузка  $q(x)$  на брус меняется линейно по длине бруса:

$$q(x) = p(x) \cdot b = b \left[ p_0 + (p_1 - p_0) \frac{x}{l} \right] \quad (0 \leq x \leq l). \quad (3)$$

Здесь  $p_0$  – давление на брус в месте его защемления, а  $p_1$  – на свободном конце бруса.

Момент инерции  $J$  прямоугольного сечения изгибаемого бруса выражается известной формулой [7]:

$$J = J(x; t) = \frac{bh^3}{12},$$

где толщина  $h$  бруса выражается формулой (1).

Момент сопротивления  $W$  сечений бруса изгибу бруса определяется не менее известной формулой [7]:

$$W = W(x; t) = \frac{bh^2}{6}. \quad (4)$$

При изгибе бруса на его выпуклой (согласно рис. 1 – на нижней поверхности) в его сечениях  $x$  возникают растягивающие напряжения  $\sigma(x)$ , величина которых является определяющей при расчете бруса на прочность. Как известно из [7],

$$\sigma(x) = \frac{M(x)}{W(x; t)}, \quad (5)$$

где  $M(x)$  – изгибающий момент, возникающий в сечении  $x$ .

Подсчитаем величину этого момента. Его создает нагрузка  $q(x)$ , приложенная к брусу правее сечения  $x$ , т.е. на его участке  $(x \leq t \leq l)$ . Так как  $dF = q(t)dt$  – сила, приложенная к брусу на его участке  $[t; t + dt]$ , а плечо этой силы равно  $t - x$ , то

$$dM(x) = (t - x)q(t)dt,$$

где  $dM(x)$  – момент силы  $dF$  относительно сечения  $x$ . А полный момент  $M(x)$  в сечении  $x$  найдем суммированием моментов  $dM(x)$  в сечении на участке  $x \leq t \leq l$ :

$$\begin{aligned} M(x) &= \sum dM(x) = \sum (t - x)q(t)dt = \\ &= \int_x^l (t - x)q(t)dt. \end{aligned}$$

Учитывая выражение (3), получим:

$$\begin{aligned} M(x) &= b \cdot \int_x^l (t - x) \left[ p_0 + (p_1 - p_0) \frac{t}{l} \right] dt = \\ &= \frac{b}{6} \left[ (p_0 + 2p_1) + (p_1 - p_0) \frac{x}{l} \right] \cdot (l - x)^2 \quad (0 \leq x \leq l). \quad (6) \end{aligned}$$

Используя выражения (4) и (6), получим, согласно (5):

$$\sigma(x) = \frac{1}{h^2} \left[ (p_0 + 2p_1) + (p_1 - p_0) \frac{x}{l} \right] \cdot (l - x)^2.$$

А так как, согласно (1) и (3),

$$h = h_0 - k \left[ p_0 + (p_1 - p_0) \frac{x}{l} \right] \cdot t,$$

то  $\sigma(x)$  принимает следующий окончательный вид:

$$\begin{aligned} \sigma = \sigma(x; t) &= \frac{\left[ (p_0 + 2p_1) + (p_1 - p_0) \frac{x}{l} \right] \cdot (l - x)^2}{\left[ h_0 - k \left[ p_0 + (p_1 - p_0) \frac{x}{l} \right] \cdot t \right]^2} \\ &\quad (t \geq 0; 0 \leq x \leq l). \end{aligned}$$

Свое максимальное значение  $\sigma_{\max}$  напряжение  $\sigma(x; t)$  принимает, очевидно, в месте защемления бруса, то есть при  $x = 0$ :

$$\sigma_{\max} = \sigma(0; t) = \frac{(p_0 + 2p_1)l^2}{(h_0 - k \cdot p_0 \cdot t)^2} \quad (t \geq 0). \quad (7)$$

Чтобы брус сохранял свою работоспособность, должно выполняться условие:

$$\sigma(0; t) \leq [\sigma], \quad (8)$$

где  $[\sigma]$  – максимально допустимое (с учетом запаса прочности) разрывное растягивающее напряжение, которое допустимо в металле изгибаемого бруса. Оно зависит от марки металла и должно быть задано. С учетом (7) неравенство (8) принимает вид:

$$\begin{aligned} \frac{(p_0 + 2p_1)l^2}{(h_0 - k \cdot p_0 \cdot t)^2} &\leq [\sigma] \Rightarrow \\ \Rightarrow 0 \leq t &\leq \left( \frac{h_0}{l} - \sqrt{\frac{p_0 + 2p_1}{[\sigma]}} \right) \cdot \frac{l}{k \cdot p_0}. \quad (9) \end{aligned}$$

Тогда ресурс детали, выраженный временем ее эксплуатации, будет определяться следующим выражением:

$$t_* = \left( \frac{h_0}{l} - \sqrt{\frac{p_0 + 2p_1}{[\sigma]}} \right) \cdot \frac{l}{k \cdot p_0}.$$

Это максимальный временной ресурс, при котором брус сохранит свою работоспособность в самом опасном своем месте – в месте защемления.

При этом нужно иметь в виду, что при возрастании нагрузки  $q(x)$  к свободному концу бруса (при  $p_1 > p_0$ ) до момента времени  $t_*$  может полностью износиться свободный конец бруса. А это разрушит брус. Поэтому нужно учитывать еще условие (2) того, что это не случится. А так как при этом  $[p(x)]_{\max} = p_1$ , то наряду с условием (9) должно выполняться условие:

$$0 \leq t \leq \frac{h_0}{k \cdot p_1}. \quad (10)$$

И только в течение времени  $t$ , удовлетворяющего обоим неравенствам (9) и (10), изгибаемый и одновременно изнашивающийся брус сохранит свою работоспособность.

## ВЫВОДЫ

1. Теоретически получено математическое выражение, позволяющее спрогнозировать ресурс консольно-закрепленных деталей при их изнашивании с учетом допускаемых напряжений и коэффициента, определяющего стойкость детали к изнашиванию.
2. Определены условия, выражающиеся двумя неравенствами, при выполнении которых деталь сохранит свою работоспособность.

## ЛИТЕРАТУРА

3. Малушин Н.Н., Валуев Д.В. Испытания деталей металлургического оборудования на износостойкость и контактную прочность предназначенного для производства деталей горно-шахтного оборудования // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). 2012. № 12. С. 90–95.
4. Косенко Е.А., Баурова Н.И., Зорин В.А. Снижение металлоемкости рабочего оборудования дорожных машин за счет использования полимерных композиционных материалов с соевым наполнением // Технология металлов. 2019. № 7. С. 27–31. doi: 10.31044/1684-2499-2019-7-0-27-31
5. Гафаров А.А., Мударисов С.Г., Фархутдинов И.М. Моделирование рабочих органов почвообрабатывающих машин и анализ их взаимодействия с учетом реологических свойств почвы // Тракторы и сельхозмашины. 2009. № 5. С. 23–27.
6. Смоляницкий Э.А. Одноковшовые гидравлические экскава-

## ДОПОЛНИТЕЛЬНО

**Вклад авторов.** Наибольший вклад распределен следующим образом: *А.М. Михальченко* — разработка идеи, написание статьи; *В.Ф. Комогорцев* — математическое обеспечение; *И.В. Козарез* — обзор имеющейся информации, корректировка текста статьи; *А.В. Дьяченко* — подготовка и отправка материалов, обзор литературы, сбор и анализ литературных источников; *М.А. Михальченко* — обзор литературы, редактирование статьи.

**Конфликт интересов.** Авторы декларируют отсутствие явных и потенциальных конфликтов интересов, связанных с публикацией настоящей статьи.

**Источник финансирования.** Авторы заявляют об отсутствии внешнего финансирования при проведении исследования.

## ADDITIONAL INFORMATION

**Author contribution.** *A.M. Mikhilchenkov* developed the research idea, wrote the manuscript. *B.F. Komogortsev* designed the mathematical support. *I.V. Kozarez* contributed to analysis of research topic information, edited the manuscript. *A.V. Dyachenko* contributed to publications review, collection and analysis of the published literature, prepared the materials for publication. *M.A. Mikhilchenkova* contributed to the research literature review and edition of the manuscript.

**Competing interests.** The authors declare no any transparent and potential conflict of interests in relation to this article publication.

**Funding source.** Authors state that this research was not supported by any external sources of funding.

торы с телескопическим рабочим оборудованием // Строительные и дорожные машины. 2017. № 8. С. 18–21.

7. Козарез И.В., Трепухов Н.М., Миненко В.И., Сары М.Л. Методы повышения ресурса долот глубоких корыхлителей // Труды инженерно-технологического факультета Брянского государственного аграрного университета. 2021. № 1. С. 24–34.

8. Михальченко А.М., Козарез И.В., Дьяченко А.В., Тюрева А.А. Изнашивание и ресурс восстановленных по различным технологиям отвалов сельскохозяйственного назначения // Технология металлов. 2021. № 1. С. 47–51. doi: 10.31044/1684-2499-2021-0-1-47-51

9. Витюнин М.А., Чикова О.А. Сопротивление материалов: учебное пособие для студентов, обучающихся по направлению «Педагогическое образование» (профиль «Технология»). Екатеринбург: Уральский государственный педагогический университет, 2014.

## REFERENCES

1. Malushin NN, Valuev DV. Ispytaniya detalei metallurgicheskogo oborudovaniya na iznosostoykost' i kontaktnuyu prochnost' prednaznachennogo dlya proizvodstva detalei gorno-shakhtnogo oborudovaniya. *Gornyi informatsionno-analiticheskii byulleten'*

(*nauchno-tekhnicheskii zhurnal*). 2012;(12):90–95. (In Russ).

2. Kosenko EA, Baurova NI, Zorin VA. Steel intensity decrease of operating equipment of road machines due to use of polymer composite material with honeycomb filler. *Technology of Metals*. 2019;(7):27–31. (In Russ). doi: 10.31044/1684-2499-2019-7-0-27-31
3. Gafarov AA, Mudarisov SG, Farkhutdinov IM. Modelirovanie rabochikh organov pochvoobrabatyvayushchikh mashin i analiz ikh vzaimodeistviya s uchetom reologicheskikh svoystv pochvy. *Traktory i sel'khoz mashiny*. 2009;(5):23–27. (In Russ).
4. Smolyanitsky EA. Hydraulic excavators with a telescopic working equipment. *Stroitel'nye i dorozhnye mashiny*. 2017;(8):18–21. (In Russ).
5. Kozarez IV, Trepoukhov NM, Minenko VI, Sary ML. Metody povysheniya resursa dolot glubokorykh litelei. *Trudy*

*inzhenerno-tekhnologicheskogo fakul'teta Bryanskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta*. 2021;(1):24–34. (In Russ).

6. Mikhachenkov AM, Kozarez IV, Dyachenko AV, Tyureva AA. Wearing and service life of agricultural machine blades restored by various technologies. *Technology of Metals*. 2021;(1):47–51. (In Russ). doi: 10.31044/1684-2499-2021-0-1-47-51
7. Vityunin MA, Chikova OA. *Soprotivlenie materialov: uchebnoe posobie dlya studentov, obuchayushchikhsya po napravleniyu «Pedagogicheskoe obrazovanie» (profil' «Tekhnologiya»)*. Yekaterinburg: Ural'skii gosudarstvennyi pedagogicheskii universitet; 2014. (In Russ).

## ОБ АВТОРАХ

### \*Михальченков Александр Михайлович

профессор, д.т.н.

Россия, 243365, Брянская обл., Выгоничский р-н, с. Кокино, ул. Советская, 2а

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3104-2548>

eLibrary SPIN: 6994-7550

E-mail: mihalchenkov.alexandr@yandex.ru

### Комогорцев Владимир Филиппович

к.ф.-м.н., доцент

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4134-366X>

eLibrary SPIN: 8972-7320

E-mail: komvf@inbox.ru

### Козарез Ирина Владимировна

к.т.н., доцент

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1702-2364>

eLibrary SPIN: 2673-3256

E-mail: ikozarez@yandex.ru

### Дьяченко Антон Вячеславович

к.т.н., доцент

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5631-3979>

eLibrary SPIN: 9509-0997

E-mail: avdyachenkoo@mail.ru

### Михальченкова Марина Александровна

Магистр, ст. преподаватель

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6527-9933>

eLibrary SPIN: 7862-2899

E-mail: mihalchenkov.alexandr@yandex.ru

\*Автор для переписки

## AUTHORS INFO

### \*Alexander M. Mikhachenkov

Professor DSc in Engineering

address: Sovetskaya street, 2a

Kokino, Vygonichsky District of Bryansk Oblast, 243365, Russia

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3104-2548>

eLibrary SPIN: 6994-7550

E-mail: mihalchenkov.alexandr@yandex.ru

### Vladimir F. Komogortsev

candidate in Physics and Mathematic, Associate Professor

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4134-366X>

eLibrary SPIN: 8972-7320

E-mail: komvf@inbox.ru

### Irina V. Kozarez

candidate in Engineering, Associate Professor

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1702-2364>

eLibrary SPIN: 2673-3256

E-mail: ikozarez@yandex.ru

### Anton V. Dyachenko

candidate in Engineering, Associate Professor

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5631-3979>

eLibrary SPIN: 9509-0997

E-mail: avdyachenkoo@mail.ru

### Marina A. Mikhachenkova

Master in Economics, Senior Lecturer

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6527-9933>

eLibrary SPIN: 7862-2899

E-mail: mihalchenkov.alexandr@yandex.ru

\*Corresponding author