

УДК 621.879

**Густов Ю.И.** – доктор технических наук, профессор**Орехов А.А.** – аспирант

E-mail: aleksejjok@rambler.ru

**Московский государственный строительный университет**

Адрес организации: 129337, Россия, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26

### **Исследование конструкционно-технологических и эксплуатационных показателей строительной техники**

#### **Аннотация**

Дан анализ конструкционных и триботехнических материалов, геометрии и эффективности применения рабочих органов отечественных и зарубежных строительных машин. Приведены результаты исследования эксплуатационных показателей ножей автогрейдера и дорожной фрезы на основе разработанного деформационно-топографического метода и двойного отношения степеней трибодформационного упрочнения системы золотой пропорции.

**Ключевые слова:** трибология, трибодформационное упрочнения, триботехнические характеристики, поверхность трения, строительные машины.

На процесс взаимодействия рабочего органа землеройной машины с грунтом существенное влияние оказывают конструкция, геометрические параметры режущих элементов. Эффективность процесса резания обеспечивается при оптимальных углах резания и рациональной геометрии режущего инструмента, а также при обоснованном выборе способа их получения и обработки.

Основные зарубежные компании, такие как ESCO, BUCYRUS BLADES (США), BYG, Metallogonia (Испания), PYRSA (Италия) и др., производящие режущие элементы для землеройных машин, используют в качестве заготовок катанную сталь и отливки. Продукция этих компаний в целом имеет схожие черты и способы изготовления [1-3].

Заготовки из катанной стали обрабатываются резанием (сверление болтовых отверстий, снятие фасок). Процесс литья позволяет использовать легированные стали сквозной прокаливаемости (отвалы, боковые накладки, зубья отвалов и др.). Преимущество литья заключается в сокращении отходов и брака, снижении эксплуатационных расходов, увеличении срока службы и производительности машины.

Высокие эксплуатационные требования к зубьям и коронкам обуславливают использование износостойких сталей и сплавов с повышенными прочностными характеристиками. Литые зубья изготавливают из стали 110Г13Л или из конструкционных марганцево-хромо-молибденовых и никелевых сталей.

Существенное влияние на работоспособность зубьев оказывают химический состав стали, термическое упрочнение, способы формообразования (методы изготовления давлением или литьем и др.).

Для производства своей продукции, частности, компания ESCO использует более 10 сплавов, способных выдерживать высокие ударные нагрузки в сочетании с абразивной износостойкостью. Например, сталь твердостью HB 514 (BHN) обладает высоким сопротивлением абразивному изнашиванию и необходимой ударной прочностью. Для ведения работ в особо тяжелых условиях специально разработаны аустенитно-марганцевые сплавы, обладающие способностью к поверхностному упрочнению.

Последним достижением компании ESCO стала разработка зубьев для разного вида и типа работ: SUPER V, SV2, S-Series POSILOK, MaxDRP.

Система SUPER V представляет собой полный комплект зубьев различной формы разработанных для достижения высокой эффективности земляных работ всех видов. Преимущества этой системы: тонкий профиль зубьев для глубокого проникновения в грунт, увеличенная стабилизационная поверхность и область восприятия нагрузки, повышенная усталостная прочность контура носа.

Система зубьев для горных работ SV2 имеет улучшенное проникновение благодаря тонкому профилю и более прочному носу.

Система зубьев S-Series POSILOK специально разработана для применения в скрепковых экскаваторах, гидравлических экскаваторах с прямой лопатой и землеройных ковшах. Нос является частью системы зубьев.

Анализ землеройной техники, используемой в России и в странах СНГ, свидетельствует о широком применении легированных термически обработанных сталей в производстве коронок для навесного оборудования бульдозеров и зубьев ковшей экскаваторов. Фирмы изготовители, такие как «CATERPILLAR» (США), «KOMATSU», «HITACHI», «KATO», «MITSUBISHI» (Япония) используют стали марок: 30ХМЛ, 27ХГСНМЛ, 35ХГС2МЛ, 30ХГСМЛ, термические обрабатываемые на структуру сорбита отпуска твердостью HV3000...3800 МПа. В России и странах СНГ коронки и зубья изготавливают из сталей марки 110Г13Л аустенитного класса твердостью HV 2400...2700 МПа. Также используют стали марок 30ХМЛ, 27ХНМЛ, 30ХНФЛ, термообработанные на сорбит отпуска твердостью HV2800...3600 МПа.

Конструкционно-технологический анализ режущих элементов землеройных машин отечественного и зарубежного производства позволяет заключить, что создание долговечных рабочих органов возможно на основе выбора функционально-градиентных материалов. Такие материалы обеспечивают рациональное сочетание противоположных свойств – твердости, обуславливающий повышенную износостойкость трущихся поверхностей, и ударной вязкости, ответственной за надежность изделия. Указанные свойства необходимо закладывать на стадии проектирования и изготовления деталей.

На кафедре «Механическое оборудование, детали машин и технология металлов» (МОДМТМ) МГСУ разработана и усовершенствуется методика выбора конструкционных триботехнических материалов по синергетическим прочностно-пластическим критериям. Установлено, что между объемными и поверхностными свойствами сталей и сплавов существует взаимосвязь вида [4]:

$$HB = (CS_k)^2 \sigma_B, \quad (1)$$

где  $\sigma_B$  – временное сопротивление разрыву;  $S_k$  – истинное сопротивление разрыву;  $HB$  – твердость;  $C = \sigma_T / \sigma_B + \delta / \psi$ ;  $\delta$ ,  $\psi$  – соответственно относительное удлинение и сужение.

Истинное сопротивление разрыву определяется выражением:

$$S_k = \sigma_B [1 + \psi / (1 - \psi_p)], \quad (2)$$

где  $\psi_p = \delta_p / (1 + \delta_p)$  – равномерное относительное сужение;

$\delta_p$  – равномерное относительное удлинение, вычисляется по формуле:

$$\delta_p = ((1 + \delta) / c^v)^{0.5} - 1, \quad (3)$$

где  $v = \psi(1 + \delta)$ .

При выборе рационального материала для режущих элементов следует учитывать микротвердость абразивных частиц ( $H_{абр}$ ), относительно которой микротвердость металла должна составлять:  $K_T = 0,6 \dots 1,0$ . Согласно (1), условием выбора материала является:

$$0,6 < [(cS_k)^2 / \sigma_B] / H_{абр} < 1. \quad (4)$$

В случае  $K_T > 1$  наблюдается поверхностное разупрочнение рабочих поверхностей. Оптимальным является случай практического равенства исходной технологической  $H_0$  и эксплуатационной поверхностной  $H_s$  твердости.

Эксплуатационная поверхностная твердость и соответственно относительная степень трибодетформационного упрочнения (или разупрочнения)  $K_s = H_s / H_0$  определяются по микротопографии поверхности трения общей зависимостью для упрочняющихся ( $K_s > 1$ ) и разупрочняющихся ( $K_s < 1$ ) металлов:

$$K_s = (D_a / D_m)^{D_m / D_a}, \quad (5)$$

где  $D_{m\gamma} = 0,618$ ,  $D_m$ ,  $D_a$  – парциальные величины микрометалла (микровыступов) и микроизноса (микровпадин) в пределах шероховатого слоя поверхности трения (рис. 1).

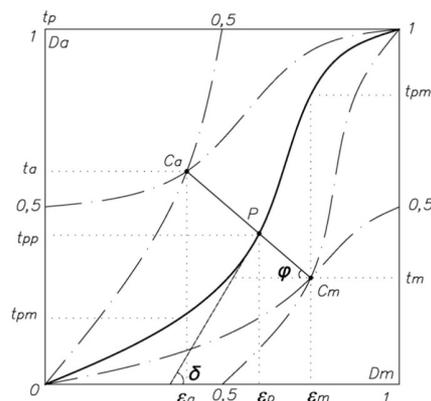


Рис. 1. Гипсограмма поверхности трения

Указанный в выражении (1) критерий  $S$  применительно к трибомеханическим характеристикам поверхностей трения определяется уравнением вида:

$$K_s^{-1} + \delta / D_a = C, \quad (6)$$

где  $\delta = 0,5(1 - t_{pp})$  – относительное удлинение металла при полюсном сближении  $\epsilon_p$ .

В результате эксплуатационных испытаний ножей автогрейдера получены следующие показатели:

Для левого ножа –  $K_s = 1,292$ ;  $D_a = 0,546$ ;  $\delta = 0,5(1 - 0,775) = 0,1125$ ;

Для среднего ножа –  $K_s = 1,351$ ;  $D_a = 0,629$ ;  $\delta = 0,5(1 - 0,52) = 0,24$ ;

Для правого ножа –  $K_s = 1,362$ ;  $D_a = 0,687$ ;  $\delta = 0,5(1 - 0,8) = 0,10$ .

Согласно [5], прирост температуры на поверхности трения за счет трибодформационного упрочнения  $K_s$  определяется выражением:

$$\Delta t_s = e_s / \alpha = \ln K_s / \alpha, \quad (7)$$

где  $\alpha = 2,15 \cdot 10^{-3} 1/^\circ\text{C}$  – среднее значение температурного коэффициента для металлов диапазона  $\alpha = (1,72 - 2,57) \cdot 10^{-3} 1/^\circ\text{C}$  [6]. При указанных значениях  $K_s$  показатели деформации  $e_s$  соответственно равны 0,256; 0,301; 0,309.

Прирост температуры в изношенном слое (продуктах износа) составляет:

$$\Delta t_a = e_a / \alpha = \ln K_a / \alpha, \quad (8)$$

где  $K_a = K_s [K_s^{0,5} + (K_s - 1)^{0,5}]$  – степень трибодформационного упрочнения продуктов износа.

Температура на поверхности трения достигает значения:

$$t_s = t_o + \Delta t_s. \quad (9)$$

Температура продуктов износа будет:

$$t_a = t_o + \Delta t_a, \quad (10)$$

где  $t_o$  – температура окружающей среды

Средняя температура на поверхности трения ножей составляет:

$$t_{\text{лев}} = t_o + 119^\circ\text{C}; \quad t_{\text{сп}} = t_o + 140^\circ\text{C}; \quad t_{\text{пр}} = t_o + 149^\circ\text{C}.$$

Максимальная температура соответственно равна:

$$t_{\text{лев}} = t_o + 149^\circ\text{C}; \quad t_{\text{сп}} = t_o + 175^\circ\text{C}; \quad t_{\text{пр}} = t_o + 180^\circ\text{C}.$$

В летнее время при температуре  $t_o = 20-30^\circ\text{C}$  максимальная температура на поверхности трения достигает  $200-210^\circ\text{C}$ .

Она соответствует температуре низкого отпуска для углеродных сталей, но не достигает температуры рекристаллизации [7]. Это означает, с одной стороны, возможность уменьшения твердости закаленных углеродистых сталей и, с другой стороны, сохранение технологического и эксплуатационного деформационного упрочнения (наклепа) ножей.

Средняя температура продуктов износа ножей достигает значений:

$$t_{\text{лев}} = t_o + 360^\circ\text{C}; \quad t_{\text{сп}} = t_o + 401^\circ\text{C}; \quad t_{\text{пр}} = t_o + 409^\circ\text{C}.$$

Максимальные температуры равны:

$$t_{\text{лев}} = t_o + 450^\circ\text{C}; \quad t_{\text{сп}} = t_o + 502^\circ\text{C}; \quad t_{\text{пр}} = t_o + 511^\circ\text{C}.$$

Они соответствуют температурам среднего отпуска, которые могут привести к термическому разупрочнению частиц износа. По-видимому, оценка трибодформационного упрочнения частиц износа (в 3-4 раза выше исходной твердости) выполнена с учетом их термического разупрочнения [8].

Для оценки механических свойств материалов и эксплуатационных показателей деталей строительной техники возможно использовать систему золотой пропорции через понятие двойного отношения – вурфа [9, 10].

В частности, с указанной целью можно использовать вурф вида:

$$W_k = K_s / K_a (1 + K_s + K_a), \quad (11)$$

где  $K_s = H_s/H_0$  – степень поверхностного трибоупрочнения детали,  $K_a = H_a/H_0$  – степень трибодформационного упрочнения продуктов износа,  $H_0$  – исходная твердость детали.

Указанные величины  $K_s$  и  $K_a$  определяются по формулам [10]:

$$K_s = (0,618/D_m)^{D_m/D_a}, K_a = K_s [K_s^{0,5} + (K_s - 1)^{0,5}]. \quad (12)$$

Значения  $W_k$  для ножей дорожной фрезы Д-530 приведены в таблице.

Двойные отношения (вурфы) ножей дорожной фрезы.

Таблица

Материалы	$H_0$ , ГПа	$K_s$	$K_a$	$W_k$	$J_h$ , мм
Сталь 45	2,2	1,51	2,93	1,383	61,56
110Г13Л	4,2	1,37	2,44	1,380	39,06
И-1	6,0	1,21	1,89	1,367	36,7
И-2	4,45	1,26	2,06	1,376	36,18
Э-3	4,3	1,20	1,85	1,367	21,71
ВСН-6+ВСН-8	5,0	1,20	1,85	1,367	17,58
СКБ	5,0	1,19	1,82	1,365	22,4
ЦН-16	5,5	1,18	1,78	1,364	20,7
ПЛ-У40Х38ГЗРТЮ	8,0	1,25	2,02	1,372	16,3
Т-620	8,2	0,905	0,707	1,299	17,1
КБХ-45	10,6	0,882	0,677	1,300	13,44
Х-5	11,3	0,85	0,605	1,290	10,43

По табличным результатам можно заключить, что вурф-критерий для исследованных материалов изменяется в пределах  $W_k = 1,290 \div 1,383$ . При этом наиболее близкие значения к «золотому вурфу»  $W_0 = 1,309$  [9] имеют наплавленные металлы Х-5, Т-620, КБХ-45. Эти материалы обеспечили наименьший износ  $J_h = 10,43; 17,1; 13,44$  мм соответственно.

Основные выводы:

1. Обзорный анализ материалов и упрочняющих технологий для рабочих органов строительной техники показал эффективность применения износостойких наплавленных металлов эвтектического типа.

2. Разработанный деформационно-топографический метод позволяет определить основные эксплуатационные показатели режущих элементов при взаимодействии с абразивной средой.

3. Для выбора рационального триботехнического материала можно использовать вурф-критерий при его соответствии «золотому вурфу»  $W_0 = 1,309$ .

### Список библиографических ссылок

1. Astakhov V. Tribology of Metal Cutting: Tribology Series. Elsevier Science Ltd, 2006. 392 ISBN: 0444528814.
2. Mechanical wear fundamentals and testing – R.G. (Raymond George), Bayer (2004). Book Details. ISBN 0824746201.
3. Biresaw G., Mittal K. Surfactants in Tribology. Volume 3 PDF Taylor & Francis Group, LLC, CRC Press, 2013, XVII. ISBN-13: 978-1-4398-8961-9.

4. Густов Ю.И., Орехов А.А., Ярмолик Н.В. Конструкционно-технологический анализ режущих элементов землеройных машин // Материалы международной научно-технической конференции «Интерстроймех-2009» Кырг. гос. ун-т строите-ва, трансп. и архит. – Бишкек, 2009. – С. 279-281.
5. Густов Ю.И. Повышение износостойкости рабочих органов и сопряжений строительных машин. – М. – 529 с.
6. Бабичев А.П., Бабушкина Н.А., Братковский А.М. Физические величины: Справочник. – М.: Энергоатомиздат, 1991. – 1232 с.
7. Арзамасов Б.Н., Макарова З.И., Мухин Г.Г. Материаловедение. – М.: Изд-ва МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2008. – 648 с.
8. Хрущов М.М., Бабичев М.А. Абразивное изнашивание. – М.: Наука 1970. – 252 с.
9. Коробко В.И. Золотое сечение и проблемы гармонии систем. Изд. АСВ. Стран СНГ. – М., 1998. – 373 с.
10. Густов Ю.И., Густов Д.Ю., Воронина И.В. Методология определения триботехнических показателей металлических материалов // Сборник докладов XVI словацко-российско-польского семинара «Теоретические основы строительства». – М., 2007. – С. 339-342.

**Gustov Yu.I.** – doctor of technical sciences, associate professor

**Orekhov A.A.** – post-graduate student

E-mail: aleksejjok@rambler.ru

**Moscow State University of Civil Engineering**

The organization address: 129337, Russia, Moscow, Yaroslavskoe shosse, 26

### **Research construction-technological and operational performance of construction equipment**

#### **Resume**

The analysis of structural and tribological materials, geometry and efficiency of working bodies of domestic and foreign construction machinery is given. The results of research performance indicators and road grader blades cutters developed based on strain-topographic method and dual degrees tribodeformative hardening attitude of the golden ratio.

There is broad use of heat-treated alloy steel in the manufacture of crowns for attachments bulldozers and excavator bucket teeth on the domestic and foreign manufacturers. Effective use is austenitic steel hardness HV 2400...2700 MPa and austenitic steel hardness of HV 2800...3600 MPa.

The expediency of technological design of functionally graded materials, providing a rational combination of opposing properties – hardness and toughness.

Shows the relationship of bulk and surface properties of metallic materials, allow you to select structural and tribological steels and alloys purpose.

As a result of the performance test grader blades set the maximum temperature on the friction surface at 200-210 °C, the temperature of the wear products 530-540 °C.

To select the sound tribological material recommended wurf criterion when it meets golden wurf  $W_0=1,309$ . A review of materials and strengthening technologies for construction equipment working bodies showed the effectiveness of wear-resistant weld metal eutectic type.

Designed topographical deformation method to determine the basic operating characteristics of the cutting elements in interaction with abrasive media.

**Keywords:** tribology, tribodeformative hardening tribological characteristics, surface friction, construction machinery.

#### **Reference list**

1. Astakhov V. Tribology of Metal Cutting: Tribology Series. Elsevier Science Ltd, 2006. 392 ISBN: 0444528814.

2. Mechanical wear fundamentals and testing – R.G. (Raymond George), Bayer (2004). Book Details. ISBN 0824746201.
3. Biresaw G., Mittal K. Surfactants in Tribology. Volume 3 PDF Taylor & Francis Group, LLC., CRC Press, 2013, XVII, ISBN-13: 978-1-4398-8961-9.
4. Gustov Yu.I., Orekhov A.A., Yarmolik N.V. Constructional and technological analysis of the cutting elements of earth-moving machines // Proceedings of the International Scientific and Technical Conference «Interstroyemeh 2009» Kyrg. gos. un-t stroite-va, transp. i arkhitekt. – Bishkek, 2009. – P. 279-281.
5. Gustov Yu.I. Improving the durability of working bodies and interfaces of construction machinery. – M. – 529 p.
6. Babichev A.P., Babushkina N.A., Bratkovskiy A.M. Physical quantities: Spravochnik. – M.: Energoatomizdat, 1991. – 1232 p.
7. Arzamasov B.N., Makarova Z.I., Mukhin G.G. Materials Engineering. – M.: Izd-va MGTU im. N.E. Bauman, 2008. – 648 p.
8. Khrushchov M.M., Babichev M.A. Abraziv wear. – M.: Nauka 1970. – 252 p.
9. Korobko V.I. Golden Section and the problem of harmony systems. Izd. ASV. Stran SNG. – M., 1998. – 373 p.
10. Gustov Yu.I., Gustov D.Yu., Voronina I.V. Methodology for determining the tribological performance of metallic materials// Collection of XVI Slovak-Russian-Polish Seminar «Theoretical Foundations of construction». – M., 2007. – P. 339-342.