

formation in the course of restoring parts] // Proceedings of the All-Russian Research Institute of Technology, Repair and Maintenance of Machines and Tractors: Vol. 113. M.: GOSNITI, 2013. Pp. 278–286.

13. Bashmakov V.I. Plastifikatsiya i uprochnenie metallicheskih kristallov pri mekhanicheskom dvoynikovanii [Lamination and hardening of metallic crystals during mechanical twinning] / V.I. Bashmakov, T.S. Chikova. Minsk: Unitary enterprise "Tehnoprint", 2001. 218 p.

14. Kravchenko I.N., Zubrilina Ye.M., Zubenko Ye.V. Obrabotka korpusnykh chugunnykh zagotovok rezaniem s nagrevom [Treatment of iron body workpieces with heating] // Farm Mechanization and Power Supply. 2012. No 2. Pp. 29–31.

15. Kravchenko I.N., Zubenko Ye.V. Vliyanie rezaniya s nagrevom na proch-nostnye svoystva naplavlennykh detaley [Effect of cutting with heating on the strength properties of welded parts] // Proceedings of the All-Russian Research Institute of Technology, Repair and Maintenance of Machines and Tractors: V. 113. M.: GOSNITI, 2013. Pp. 339–346.

16. Kotelnikov V.I., Gavrilov G.N., Mironov A.Ye., Gavrin V.S. Povyschenie kachestva poverkhnostnogo sloya nakatyvaniem metalla s nagrevom [Improving the quality of metal surface layers using rolling with heating] // Modern Problems of Science and Education. 2014. No 4. URL: <http://www.science-education.ru/ru/article/view?id=14121>.

Received on February 24, 2016

УДК 631.3.004.67-631.145

БОНДАРЕВА ГАЛИНА ИВАНОВНА, докт. техн. наук, профессор¹

E-mail: Boss2569@yandex.ru

ПЕГУШИН АЛЕКСАНДР ВЛАДИМИРОВИЧ¹

E-mail: alexpegushin@mail.ru

¹ Российский государственный аграрный университет – МСХА имени К.А. Тимирязева, ул. Тимирязевская, 55, Москва, 127550, Российская Федерация

ДЕФОРМАЦИЯ ВРАЩАЮЩИХСЯ РАБОЧИХ ОРГАНОВ ПРИ ВЗАИМОДЕЙСТВИИ С АБРАЗИВОМ В СПЛОШНОЙ СРЕДЕ

При вращении рабочих органов технологического оборудования во время приготовления растворов, кроме абразивного воздействия от мелких фракций, будет еще и ударное воздействие от крупных фракций. В зависимости от форм зерен устанавливается три группы щебня из естественного камня: кубовидная, улучшенная и обычная, а также зерна пластинчатой и игловатой формы. Под их воздействием и происходит ударно-абразивное изнашивание. Применительно к составным рабочим элементам строительного оборудования бетоносмесительного производства вопросы теории конструкционной износостойкости являются определяющими направлениями повышения их долговечности, эксплуатационной надежности и работоспособности. Решение этой проблемы осуществляется на основе изучения физических процессов изнашивания в большинстве случаев плоскостных криволинейных рабочих поверхностей. Доказано, что при ударно-абразивном внедрении частицы заполнителей строительных смесей в поверхность рабочих элементов смесителей волны пластического деформирования воздействуют не только на срезаемый слой, но и на структуру металла, расположенного по ходу движения частиц за линией среза. Изучили физические процессы взаимодействия частиц с обрабатываемой поверхностью и построили физические и математические модели. Применили методы фрактологии, с помощью которых исследовали микрочастицы металла, образующиеся при ударе абразивных частиц по поверхности при различных углах атаки и формы трещин от их воздействия. Установили, что большое влияние на механизм воздействия абразивной частицы оказывает угол ее атаки.

Ключевые слова: частица, кристалл, решетка, зерно, смесь.

Опыт эксплуатации зарубежных и отечественных машин и оборудования природообустройства показывает, что основной причиной частых отказов является износ рабочих органов технологического оборудования машин. Преждевременность отказов объясняется причиной интенсивного изнашивания низкоресурсных деталей в результате приготовления высокоабразивных строительных смесей (с кусковатым заполнителем – доменным шлаком, гранитом, базальтом и др.).

Цель исследований – изучение физических процессов изнашивания плоскостных криволинейных рабочих поверхностей.

Применительно к составным рабочим элементам строительного оборудования бетоносмесительного производства вопросы теории конструкционной износостойкости являются определяющими направлениями повышения их долговечности, эксплуатационной надежности и работоспособности. Решение этой проблемы осуществляется на основе изучения физических процессов изнашивания в большинстве случаев плоскостных криволинейных рабочих поверхностей [1].

При ударно-абразивном внедрении частиц заполнителей строительных смесей в поверхность рабочих элементов смесителей волны пластического деформирования воздействуют не только на срезаемый слой, но и на структуру металла, расположенного по ходу движения частиц за линией среза [2, 3]. Большинство металлов имеют объемно- и гранецентрированную упаковку (рис. 1) с равными координационным числом ($N = 12$) и плотностью упаковки (атомы занимают 74% общего объема кристалла).

В узлах кристаллической решетки металлов располагаются положительные ионы. При образовании этой решетки валентные электроны, сравнительно слабо связанные с атомами, отделяются и коллективизируются (принадлежат не одному атому, а в целом всему кристаллу). Металл поверхности вдоль режущей кромки абразивной частицы подвергается воздействию нормальной сжимающей силы и силы трения, действующей в направлении линии среза [4]. При этом нормальная сила вызывает деформацию сжатия, а сила трения – деформацию растяжения в поверхностном слое обрабатыва-

емого материала. При этом происходит локальное жесткое движение микроэлементов [5].

Материальная точка P тела B , имеющего объем V и поверхность S , в недеформированном и ненапряженном состоянии может определяться своими ортогональными координатами X_1, X_2, X_3 или $X_K, K = 1, 2, 3$ (рис. 2).

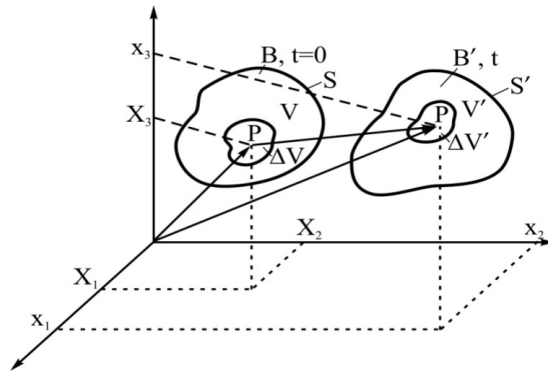


Рис. 2. Материально-пространственные координаты

При деформировании под действием некоторых внешних нагрузок оно займет область, имеющую объем V' и поверхность S' . В той же самой ортогональной системе отсчета новое положение точки P будет X_1', X_2', X_3' (или кратко $X_K', k = 1, 2, 3$).

В предположении неразрушаемости и непроницаемости вещества каждая материальная точка недеформированного тела B займет единственное положение в деформированном теле B' .

Обратно каждой точке в B' можно сопоставить единственную точку в B . Таким образом, деформацию тела в момент времени t можно описать взаимно однозначным отображением

$$x_k = x_k(X_1, X_2, X_3, t), k = 1, 2, 3 \quad (1)$$

или обратным ему

$$X_K = X_K(x_1, x_2, x_3, t), K = 1, 2, 3. \quad (2)$$

Существует предположение, что уравнения (2) являются единственным обращением уравнений (1) во всех точках тела, за исключением, возможно, некоторых особых поверхностей, линий и точек. Для этого три функции $x_k(X_1, X_2, X_3, t)$ должны обладать непрерывными частными производными по X_1, X_2, X_3 в любые моменты времени и якобиан

$$J \equiv \det \frac{\partial x_k}{\partial X_K} = \begin{vmatrix} \partial x_1 / \partial X_1 & \partial x_1 / \partial X_2 & \partial x_1 / \partial X_3 \\ \partial x_2 / \partial X_1 & \partial x_2 / \partial X_2 & \partial x_2 / \partial X_3 \\ \partial x_3 / \partial X_1 & \partial x_3 / \partial X_2 & \partial x_3 / \partial X_3 \end{vmatrix} \quad (3)$$

не должен обращаться в нуль, при этом частные производные $x_{k,K} \equiv \partial x_k / \partial X_K, x_{K,k} \equiv \partial X_K / \partial x_k$ являются градиентами деформации.

Геометрический смысл различных мер деформации и вращения можно быстро понять, рассмат-

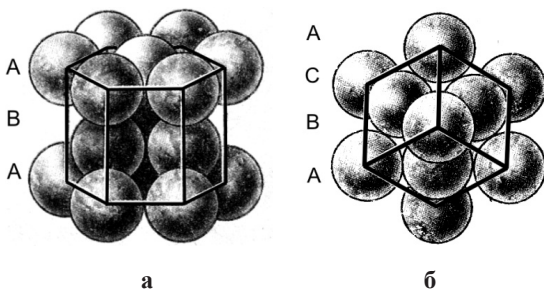


Рис. 1. Виды упаковки кристаллов металла:
а) объемно-центрированная;
б) гранецентрированная

ривая приращение $dx^{(a)}$ вектора $x^{(a)}$ как векторную сумму трех приращений:

$$\begin{cases} dx_1 = dX - dX \cdot R + E_{KL}dX_K I_L \\ dx_2 = -dX \cdot \Gamma + \Gamma_{(KL)}dX_K I_L \\ dx_3 = d\varepsilon - d\varepsilon \cdot \Phi \end{cases}, \quad (4)$$

где Ξ – радиус вектор точки микроэлемента; I_L – базисный вектор для материальных координат; Φ , R , Γ – тензоры микросмещения, вращения и микродеформации; E_{KL} – Лагранжев тензор деформации [6].

Таким образом, в правой части первого равенства системы (4) первый член dX представляет перенос dx из точки X в точку x , второй – вращение, а последний член – деформирование тела. Рассмотрим вектор dx в точке X недеформированного элемента объема dV . Этот вектор после деформации переходит в dx . Запишем это выражение в иной форме:

$$dx = C_K dX_K; \quad C_K \equiv \partial x / \partial X_K = I_K + U_{M,K} I_M, \quad (5)$$

где C_K – тензор деформации Грина; $U_{M,K}$ – вектор смещения [7].

Заметим, что параллелепипед с векторами ребер $I_1 dX_1$, $I_2 dX_2$ и $I_3 dX_3$ (рис. 3) после деформации становится прямолинейным с векторами ребер $C_1 dX_1$, $C_2 dX_2$ и $C_3 dX_3$.

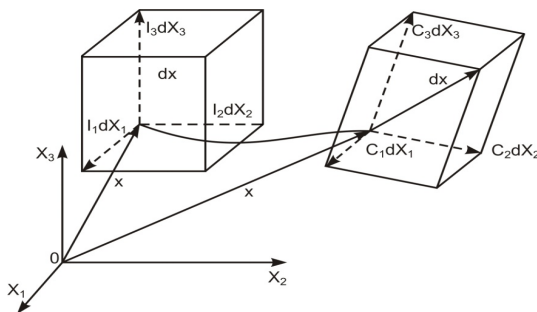


Рис. 3. Деформирование кристаллической решетки металла

Материалы и методы исследований. Применение методов фрактологии к исследованию ударно-абразивного изнашивания позволили обосновать физические процессы взаимодействия частиц с обрабатываемой поверхностью и построить физические и математические модели. Аналогично решается задача для внедрения абразивной частицы неправильной формы в обрабатываемую поверхность (рис. 4), причем 10% всех выемок имеют форму, приближающуюся к сферической (рис. 4а), а остальные 90% – форму, приближающуюся к треугольной (каплевидной) и прямоугольной (рис. 4б, в).

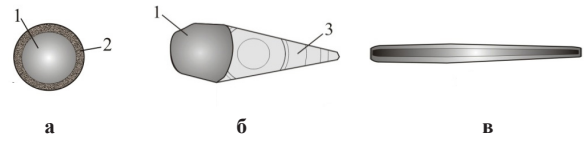


Рис. 4. Виды форм лунок в зависимости от угла атаки абразивной частицей: а) сферическая при $\alpha = 90^\circ$; б) каплевидная при $\alpha = 45^\circ$; в) прямоугольная при $\alpha = 30^\circ$; 1 – зона удара; 2 – наваообразование; 3 – зона разрушения частицы

Результаты исследований. Согласно методам фрактологии исследовали микрочастицы металла, образующиеся при ударе абразивных частиц по поверхности при различных углах атаки и формы трещин от их воздействия (рис. 5).

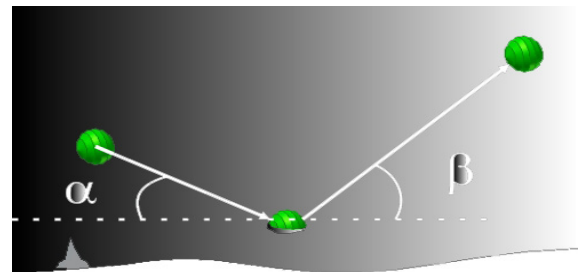


Рис. 5. Схема выбивания зерна с поверхности стали: α – угол атаки абразивных частиц ($\alpha = 20^\circ$); β – угол выхода абразивных частиц ($\beta = 45^\circ$)

Характерной особенностью сталей является образование навалов по краям лунки и впереди движения абразивных частиц, вследствие чего угол ее выхода β всегда больше угла атаки α (рис. 5). При этом возможно, что частицы в процессе движения будут разрушаться, тогда форма лунки принимает каплевидный вид (рис. 4), что наблюдается при углах атаки $30^\circ \leq \alpha \leq 45^\circ$. Если частицы не разрушаются, то форма лунки – продолговатая, прямоугольной формы при углах атаки $\alpha \leq 30^\circ$ [8, 9]. Образовавшиеся при этом навалы обладают твердостью, иногда превышающей твердость самого металла.

При очередном соударении абразивных частиц выступы, имея наиболее благоприятное расположение своих граней к проникновению, внедряются в поверхность металла [10]. Навалы с меньшей твердостью обычно разрушаются, не повреждая поверхности детали.

Большое влияние на механизм воздействия абразивной частицы оказывает угол ее атаки (соотношение нормальной и касательной составляющей силы воздействия абразивной частицы на ее поверхность). С ростом угла атаки происходит увеличение нормальной и уменьшение касательной

составляющей силы контактного давления, вследствие чего снижается вероятность микрорезания, становится все более округлой микростружка, углы ее оплавлены, что указывает на высокую температуру в зоне удара [11, 12].

Исследования формообразования лунок при углах атаки $\alpha < 30^\circ$ показывают, что частицы скользят по поверхности обрабатываемого металла, и форма лунок – продолговатая. Данный факт свидетельствует об интенсивности протекания процесса пластической деформации. При углах атаки $\alpha > 45^\circ$ длина лунки значительно короче по сравнению с меньшим углом атаки ($\alpha < 45^\circ$).

Выводы

При воздействии рабочих органов различных строительных смесителей технологического оборудования на массу бетона (раствора) происходит сложное вихревое движение слоев, т.е. турбулентный поток, интенсивность которого будет доминировать в центре смесителя. Для описания процесса турбулизации необходимо задавать соответствующие граничные условия в явном виде, что в действительности невозможно. Поэтому примем следующие допущения: перемешиваемая смесь представляет собой однородное гидравлическое вещество с вязкостью η и плотностью ρ , в котором вместе с создаваемыми потоками движутся крупные тела плотностью ρ_t и средним диаметром d .

Библиографический список

1. Исупов М.Г. Разработка и исследование технологии струйно-абразивной финишной обработки: Автореф. дис. ... д-ра техн. наук. Ижевск, 2006. 40 с.
2. Орлов Б.Н. Технологические основы кинетики разрушения машин и оборудования природо-

обустройства: Монография / Б.Н. Орлов. М.: ФГОУ ВПО МГУП, 2006. 285 с.

3. Бондарева Г.И. Исследование напряженно-деформированного состояния наплавленных покрытий деталей, восстановленных плазменными методами / Г.И. Бондарева, И.Н. Кравченко, В.Ю. Гладков // Ремонт, восстановление, модернизация. 2011. № 6. С. 2–6.

4. Проволоцкий А.Е. Струйно-абразивная обработка деталей машин. Киев: Техника, 1989. 279 с.

5. Тененбаум М.М. Закономерности абразивного изнашивания деталей и рабочих органов сельскохозяйственных машин // Трение и износ. 1980. № 2. С. 357–364.

6. Bondareva G.I. Extending the life of concrete-mixer components. Russian Engineering Research. 2012. Vol. 32. No 3. Pp. 229–236.

7. Бондарева Г.И. Основы надежности технических систем: Учебное пособие / Г.И. Бондарева. М.: ФГОУ ВПО МГАУ, 2008. С. 173.

8. Орлов Б.Н. Физические основы и уровень надежности деталей машин и механизмов: Учебное пособие / Б.Н. Орлов. М.: ФГОУ ВПО МГУП, 2008. 127 с.

9. The Delphi Method: Techniques and Applications / Ed/by H. Linstone. L., 1975. 620 p.

10. Кравченко И.Н. Физико-математическая модель отказов быстроизнашивающихся рабочих элементов строительных машин и технического оборудования / И.Н. Кравченко, Г.И. Бондарева, А.В. Чепурин // Ремонт, восстановление, модернизация. 2007. № 8. С. 2–6.

11. Бондарева Г.И. Математическое моделирование процесса изменения годности рабочих элементов машин и оборудования / Г.И. Бондарева, Б.Н. Орлов // Техника и оборудование для села. 2012. С. 36–38.

12. Бондарева Г.И. Метрология: измерение массы в АПК: Учебное пособие / Г.И. Бондарева, О.А. Леонов. М.: ФГНУ «Росинформагротех», 2014. 344 с.

Статья поступила 8. 04.2016

DEFOMATION OF ROTATING WORKING ELEMENTS IN CONTACT WITH ABRASIVES IN A CONTINUOUS MEDIUM

GALINA I. BONDAREVA, DSc (Eng), Professor¹

E-mail: Boss2569@yandex.ru

ALEKSANDR V. PEGUSHIN, a graduate student¹

E-mail: alexpegushin@mail.ru

¹ Russian State Agrarian University - Moscow Agricultural Academy named after K.A. Timiryazev, Timiryazevskaya str., 49, Moscow, 127550, Russian Federation

The paper considers the fact that the rotation of the process equipment working bodies during solution making is accompanied not only with the abrasive action of fine particles but also with the impact action from major factions. Depending on the grain form there are three groups of natural stone rubble: cuboid, improved

and regular, as well as grains of a lamellar and a prickly form. Their actions result in shock-abrasive wear. With regard to constituent working elements of construction equipment for concrete mixing production, the issues of structural durability theory determine the ways of increasing their durability, robustness and efficiency. The solution to this problem is based on the study of physical wear processes that are generally related to planar curved working surfaces. The authors prove that during the impact-abrasive introduction of building mixes particles into the surface of mixer working elements, plastic deformation waves make an impact not only on the cut layer, but also on the metal structure, the metal being located along the particle motion behind the cutoff line. The authors have studied physical processes of the interaction of particles with the treated surface and designed physical and mathematical models applying the fractology methods to examine metal microparticles formed in the collision of abrasive particles with the surface at different attack angles and crack forms resulting from their impact. It has been established that the attack angle of abrasive particles has great influence on their impact mechanism.

Key words: particle, crystal, lattice, grain, mixture.

References

1. Isupov M.G. Razrabotka i issledovanie tekhnologii struyno-abrazivnoy finishnoy obrabotki: Avtoref. dis. d-ra tekhn. nauk [Development and research of jet-abrasive finishing technology: Self-review of DSc (Eng) thesis]. Izhevsk, 2006. 40 p.
2. Orlov B.N. Tekhnologicheskie osnovy kinetiki razrusheniya mashin i oborudovaniya prirodobustroystva: monografiya [Technological bases of the kinetics of environmental engineering machinery and equipment destruction: monograph] / B.N. Orlov. M.: FSEE HPE MSUEE, 2006. 285 p.
3. Bondareva G.I. Issledovanie napryazhenno-deformirovannogo sostoyaniya naplavlennykh pokrytiy detaley, vosstanovlennykh plazmennymi metodami [Studying the stress-strain state of deposited coatings of parts recovered with plasma methods] / G.I. Bondareva, I.N. Kravchenko, V.Y. Gladkov // Repair, Restoration, Modernization. 2011. No 6. Pp. 2–6.
4. Provolotsky A.Ye. Struyno-abrazivnaya obrabotka detaley mashin. [Liquid blasting of machinery parts]. Kiev: Tekhnika, 1989. 279 p.
5. Tenenbaum M.M. Zakonomernosti abrazivnogo iznashivaniya detaley i rabochikh organov sel'skokhozyaystvennykh mashin [Laws of abrasive wear of farm machinery parts and working units] // Treniye i iznos [Friction and Wear] 1980. No 2. Pp. 357–364.
6. Bondareva G.I. Extending the life of concrete-mixer components. Russian Engineering Research. 2012. Vol. 32. No 3. Pp. 229–236.
7. Bondareva G.I. Osnovy nadezhnosti tekhnicheskikh sistem: Uchebnoe posobie [Fundamentals of technical systems reliability: Study manual] / G.I. Bondareva. M.: FSEE HPE MSAU, 2008. 173 p.
8. Orlov B.N. Fizicheskie osnovy i uroven' nadezhnosti detaley mashin i mekhanizmov: Uchebnoe posobie [Physical basics and reliability of machinery parts and mechanisms: Study manual] / B.N. Orlov. M.: FSEE HPE MSUEE, 2008. 127 p.
9. The Delphi Method: Techniques and Applications / Ed/by H. Linstone. L., 1975. 620 p.
10. Kravchenko I.N. Fiziko-matematicheskaya model' otkazov bystroiznashivayushchikhsya rabochikh elementov stroitel'nykh mashin i tekhnicheskogo oborudovaniya [Physical and mathematical refusal model of the wear of construction machinery and technical equipment working units] / I.N. Kravchenko, B.N. Bondarev, A.V. Chepurin // Repair, Restoration, Modernization. 2007. No 8. Pp. 2–6.
11. Bondareva G.I. Matematicheskoe modelirovanie protsessa izmeneniya godnosti rabochikh elementov mashin i oborudovaniya [Mathematical modeling of changes in the working life of machinery and equipment units] / G.I. Bondareva, B.N. Orlov // Farm Machinery and Equipment. 2012. Pp. 36–38.
12. Bondareva G.I. Metrologiya: izmerenie massy v APK: Uchebnoe posobie [Metrology: weight measurement in agribusiness: Study manual] / G.I. Bondareva, O.A. Leonov. M.: Federal State Scientific Establishment "Rosinformagrotekh", 2014. 344 p.

Received on April 8, 2016