

13. Boikov V.Y., Balabanov V.I., Akhmetzyanov A.F. Sravnitel'nye eksperimental'nye issledovaniya germetikov sistemy okhlazhdeniya dvigatelya vnutrennego sgoraniya [Comparative experimental research of sealants of the internal combustion engine cooling system] / Proceedings of GOSNITI. 2015. 120. Pp. 148–152.

14. Beklemyshev V.I., Makhonin I.I., Letov A.F., Filippov V.K., Balabanov V.I. Vliyanie metalloorganicheskikh prisadok RENOM na poverkhnosti treniya i pokazateli avtomobil'noy tekhniki [Influence of RENOM organometallic additives on friction surfaces and automotive machinery indicators] // Vestnik mashinostroeniya [Engineering Herald]. 2004. No 10. Pp. 51–55.

Received on March 9, 2016

УДК 621.9.01

**КРАВЧЕНКО ИГОРЬ НИКОЛАЕВИЧ**, докт. техн. наук, профессор<sup>1</sup>

E-mail: kravchenko-in71@yandex.ru

**КОТЕЛЬНИКОВ ВЛАДИМИР ИВАНОВИЧ**, канд. техн. наук, профессор<sup>2</sup>

E-mail: nntu@nntu.nnov.ru

**ДОБЫЧИН МИХАИЛ ВАСИЛЬЕВИЧ**<sup>1</sup>

E-mail: mr.kep@yandex.ru

**МАКАРОВ КИРИЛЛ ВЛАДИМИРОВИЧ**<sup>1</sup>

E-mail: makarov177@rambler.ru

<sup>1</sup> Российский государственный аграрный университет – МСХА имени К.А. Тимирязева, ул. Тимирязевская, 49, Москва, 127550, Российская Федерация

<sup>2</sup> Нижегородский государственный технический университет имени Р.Е. Алексеева, ул. Минина, 24, Нижний Новгород, 603950, Российская Федерация

## ИССЛЕДОВАНИЕ ВЗАИМОСВЯЗИ ПЛОТНОСТИ ДИСЛОКАЦИЙ В ДЕФОРМИРУЕМОМ ОБЪЕМЕ ПОВЕРХНОСТНОГО СЛОЯ МЕТАЛЛОВ

Проблема износостойкости тесно связана с исследованием процессов упрочнения и разрушения поверхностных слоёв металлов при их взаимодействии. Данная проблема может быть решена на основе изучения закономерностей изменения структур поверхностного слоя. Проблематичным является вопрос кинетики изнашивания и её взаимосвязи с процессами пластической деформации поверхностного слоя металлов. Статья посвящена установлению количественной взаимосвязи накапливаемой плотности дислокаций в деформируемом объеме поверхностного слоя стальной толстостенной втулки, обработанной выглаживанием холодным способом и резанием с нагревом. Провели теоретический анализ данной взаимосвязи, который базируется на основе физики твердого тела, в частности, на теории дислокаций, а также на ее инженерных приложениях. В зависимости от условий и вида обработки конструкционной и легированной стали получены различные значения плотности дислокаций в металле. Установленные закономерности взаимовлияния процессов пластической деформации поверхностного слоя металлов позволяют определить пути управления износостойкостью материалов. В результате экспериментальных исследований было установлено, что поверхность металла втулки, обработанной обычным холодным методом, оказалась покрыта видимыми раскрывшимися микротрещинами с углом наклона в сторону выглаживания. Поверхностный слой металла втулки, обработанной с нагревом, таких микротрещин не имеет. Наглядное сравнение полученных результатов исследования доказывает полное отсутствие микротрещин в поверхностном слое детали, обработанной резанием с нагревом. При этом можно предположить, что полученный таким образом поверхностный слой будет работать в любом скользящем соединении в два-три раза дольше, чем

соединение, собранное из деталей, обработанных обычным холодным способом. Показано, что учёт характера распределения дислокаций является существенным при оптимизации расчёта их плотности.

**Ключевые слова:** дислокационная структура, микротрещины, обработка деталей, пластическая деформация, пластический сдвиг, плотность дислокаций, поверхностный слой.

В технологии металлов, металловедении и физике металлов достаточно широко используется ряд понятий и терминов, количественную значимость которых оценить практически невозможно. К ним в первую очередь относится понятие о плотности дислокаций. Зачастую многие авторы ставят плотность дислокаций в зависимость от какого-либо вида обработки металла, причем попытки дать количественную оценку плотности и распределению дислокаций в металле довольно часты. Придуманы даже математические формулы для её подсчета. Однако исследований о наличии либо об отсутствии дислокаций инструментальными методами практически нет. В физике металлов понятие о плотности дислокаций принято как аксиома без каких-либо доказательств.

Существует масса литературы, в которой дислокационные процессы в металле увязываются с деформациями, в том числе и на внутрикристалли-

ческом уровне [1–3]. Так, в работе [4] рассматривается плотность дислокаций в зависимости от видов обработки металла резанием, а также приводятся данные о плотности дислокаций после механической обработки резанием (табл. 1).

**Цель исследования** – установление количественной взаимосвязи накапливаемой плотности дислокаций в деформируемом объеме поверхностного слоя с внешними параметрами процессов при холодном выглаживании и резании с нагревом.

**Методика исследования.** Теоретический анализ взаимосвязи накапливаемой плотности дислокаций в поверхностном слое с условиями внешнего воздействия при холодном выглаживании и резании с нагревом базировался на основе физики твердого тела, в частности, на теории дислокаций, а также ее инженерных приложениях.

**Результаты и обсуждение.** Анализ результатов исследований показывает [5], что плотность

Таблица 1

Значения плотности дислокаций после механической обработки резанием

Метод обработки	Условия обработки				Достижимые параметры		
	инструмент	глубина резания, мм	подача	скорость	качество точности	R <sub>a</sub> , мкм	плотность дислокаций, см <sup>-2</sup>
Чистовое точение	Вок 71	0,6...0,8	0,08...0,12 мм/об	140...160 м/мин	7...8	0,63...1,25	(5,0...10,0) x 10 <sup>10</sup>
Тонкое точение	Композит 10	0,2...0,4	0,04...0,06 мм/об	180...200 м/мин	6...7	0,32...0,63	(4,0...7,0) x 10 <sup>10</sup>
Чистовое круглое наружное шлифование	23 А зерно 12	0,006...0,008	300...400 мм/мин	30 м/с	6...7	0,32...0,63	(2,0...4,0) x 10 <sup>10</sup>
Чистовое круглое наружное шлифование с выхаживанием	23 А зерно 12 мкм	0,006...0,008	300...400 мм/мин	30 м/с	6...7	0,16...0,32	(0,8...1,5) x 10 <sup>10</sup>
Тонкое круглое наружное шлифование	АСК зерно 28 мкм	0,004...0,006	100...200 мм/мин	60 м/с	6	0,08...0,16	(5,0...7,0) x 10 <sup>10</sup>
Алмазное выглаживание	АСПК радиус 1,5 мкм	Нагрузка 160...220 Н	0,05...0,07 мм/об	120...160 м/мин	7...8	0,08...0,16	(0,8...1,2) x 10 <sup>11</sup>
Лепестковое полирование	ЛКП 14 А8	Натяг лепестков 1,0...1,2	2000 мм/мин	35 м/с	6...7	0,1...0,3	(0,6...1,0) x 10 <sup>10</sup>

дислокаций имеется не во всем объеме металла, а только в поверхностном слое, причем толщина поверхностного слоя и инструментарий для замера плотности дислокаций не указываются. Кроме того, не указаны марки закаленных конструкционных и легированных сталей, а приведены только режимы резания, которые в промышленности назначаются для каждого вида обработки, каждого вида режущего инструмента и каждой марки стали индивидуально.

На наш взгляд, здесь допущено несколько погрешностей:

1. Шлифование указанным кругом из электрокорунда с зерном 12 мкм имеет ограничение по скорости резания, равной 23 м/с.

2. Чистовое точение при выполнении обработки в 7...8 квалитете точности дает шероховатость 2,5...3,6 мкм, а тонкое точение – 0,63...1,25 мкм.

Результаты анализа показывают [6-10], что тонкое круглое шлифование практически дает те же результаты по плотности дислокаций, что и тонкое точение, в то время как на поверхности при этих видах обработки воздействуют совершенно разные инструменты, с разными принципами резания и разными глубинами распространения напряжений в поверхностном слое обрабатываемой детали. Однако полученные данные представляют интерес в том плане, что плотность распределения дислокаций увязана с видами холодной обработки металла без учета процесса деформации металла в корне стружки при резании и определена по методике [11].

Попробуем разобраться с понятиями, определениями и тем, что же на практике измеряется и рассчитывается исследователями под видом плотности дислокаций.

В соответствии с определением, принятым в физике металлов, дислокациями являются плоскости, линии или точки, вдоль или вокруг которых происходит сдвиг кристаллов металла при деформации. При этом вероятность возникновения дислокаций зависит от физико-механических свойств металла, температуры, прикладываемого усилия и скорости деформации металла. Рассчитать такую вероятность проблематично даже с использованием теории относительности и электронно-цифровых вычислительных машин. Исходя из данного определения, измерять инструментально дислокации, как плоскости вероятностного перемещения кристаллов металла относительно друг друга, либо оси поворота кристаллов относительно друг друга при деформации, практически невозможно. Тогда возникает вопрос: что же на самом деле измеряют другие исследователи? Что они имеют в виду под термином «плотность дислокаций»?

Разобраться помогут утверждения, указывающие на связь дислокаций со свойствами поверхностного слоя металла после обработки. При этом значительный интерес представляет статистическая связь между величиной плотности дислокаций и поверхностной микротвердостью, степенью наклепа и поверхностными технологическими оста-

точными напряжениями. Опустим то, что микротвердость поверхности является измерительным параметром наклепа металла, и то, что напряжения не лежат на поверхности, а распространяется на некоторую глубину в поверхностном слое металла.

Остановимся более подробно на напряжениях в металле, возникающих в процессе механической обработки, которые приводят к его разрушению при эксплуатации. При этом необходимо отметить, что любое напряжение в конструкции изделия возникает под действием силы либо изгибающего момента (при скручивании, сжатии, растягивании и т.п., воздействии на деталь как на составную часть всей конструкции).

По мнению многих авторов [2, 12], в поверхностном слое любой металлической детали после холодной механической обработки резанием всегда остаются остаточные напряжения. Другими словами, обработка металла резанием всегда сопряжена с созданием напряженного слоя металла. Чтобы избавиться от напряжений в поверхностном слое, проводят искусственное старение обработанной детали.

После механической обработки всегда поверхность готовой детали покрыта микротрещинами, которые раскрываются и сливаются друг с другом при приложении внешнего воздействия в ходе эксплуатации. Большая часть трещин образовалась в момент деформации и отрыва части металла в корне стружки, а меньшая – в результате работы напряжений растягивания в поверхностном слое уже после обработки. С точки зрения металловедения, деформация может идти внутри металла двумя способами: первый – скольжением кристаллов относительно друг друга по кристаллическим плоскостям, и второе – с помощью так называемого двойникования [13]. При деформации металла никаких разворотов вокруг дислокационных линий и точек нет.

Практически металловедение не связывает ликвиции элементов в структуре металла с деформациями, так как сталь – это твердый раствор углерода в железе, и количественное перераспределение углерода создает различные структуры металла (феррит, перлит и др.). Кроме этого, в ходе металлургического передела в сталь вводят различные химические элементы (хром, никель, марганец, титан), которые размещаются по границам кристалла железа. Данные примеси значительно влияют на свойства металла. При различных видах термической обработки и различном процентном соотношении элементов в химическом составе стали они измельчают структуру металла, делая его более прочным.

Считается, что с измельчением структуры металла плотность дислокаций растет. Объясняется это тем, что с измельчением структуры увеличивается площадь раздела между зернами металла. Косвенным подтверждением увеличения количества дислокаций является снижение параметров шероховатости при механической обработке резанием закаленной стали. Несмотря на то, что сам процесс резания происходит с большими усилиями резания,

чем при обработке незакаленной стали того же химического состава, нагрев металла увеличивает колебания атомов в узлах кристаллической решетки, облегчая деформационные сдвиги кристаллов относительно друг друга.

При определенных условиях резания металла с нагревом характер деформационного сдвига металла в корне стружки меняется, и происходит чистый срез металла без образования в поверхностном слое обработанной детали микротрещин надрыва, присущих холодному резанию.

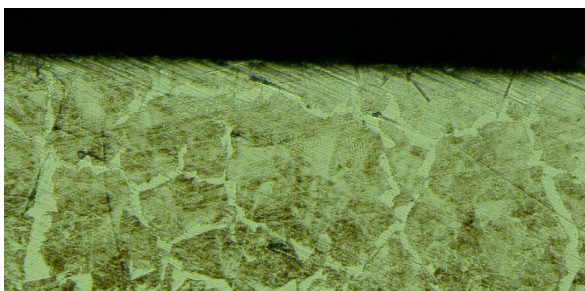
В ходе резания с нагревом также происходят структурные изменения. Зерно от нагрева в структуре увеличивается в размерах. Казалось бы, что это уменьшит количество дислокаций и затруднит процесс деформационного сдвига металла в корне стружки. Однако нагрев снижает усилие резания за счет увеличения пластических свойств нагретого металла, что в конечном итоге приводит к резанию с большей точностью и меньшими параметрами шероховатости, чем при холодном резании того же металла.

Полагаем, что именно замер количества микротрещин, отнесенных к единице площади поверхности металла, и принимается исследователями за «плотность дислокаций». Это количественный замер дефектов поверхности. Он не менее важен, чем определение параметров шероховатости и точности выполняемого размера, ибо от наличия (отсутствия) микротрещин зависит длительность безаварийной эксплуатации металлических изделий [6–10]. Подтверждением этого положения служит экспериментально подтвержденный факт изменения цикла нагружений на сваренную деталь после холодной механической обработки и после обработки резанием с нагревом [14, 15]. Как показали проведенные исследования, процесс обработки металла резанием с нагревом не сопровождается образованием микротрещин в поверхностном слое металла. Это явление зафиксировано микроструктурными исследованиями на металлических образцах, обработанных резанием с нагревом [12, 16].

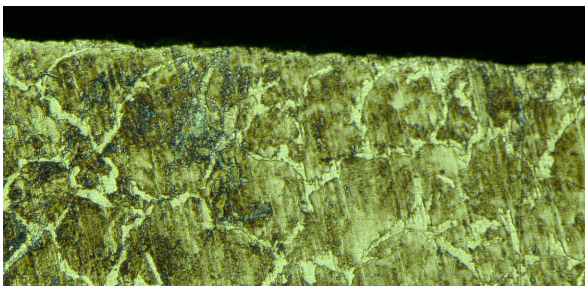
Чтобы подтвердить наличие микротрещин в поверхностном слое металла после холодной механической обработки резанием, авторами проведены экспериментальные исследования. Стальную толстостенную втулку подвергли обработке выглаживанием на токарном станке. Применяя выглаживающий инструмент со сферической рабочей частью из сплава Т5К10, производили обработку внутренней поверхности вращающейся холодной стальной втулки при различных режимах. Затем из обработанной втулки вырезали образцы для микроструктурных исследований.

Эксперименты по выглаживанию внутренней поверхности втулки повторяли при тех же режимах обработки, но уже нагретой до температуры 500...600°C стальной поллой толстостенной детали. Из обработанной с нагревом втулки также вырезали образцы для микроструктурных исследований.

Результаты металлографического анализа образцов приведены на рисунках 1, 2.



**Рис. 1. Микроструктура поверхностного слоя стальной втулки, обработанной выглаживанием холодным способом (×500)**



**Рис. 2. Микроструктура поверхностного слоя, обработанного выглаживанием нагретой стальной втулки до температуры 500...600°C (×500)**

### Выводы

1. Поверхность металла втулки, обработанной обычным холодным методом, оказалась покрыта видимыми раскрывшимися микротрещинами с углом наклона в сторону выглаживания. Поверхностный слой металла втулки, обработанной с нагревом, таких микротрещин не имеет.

2. Наглядное сравнение полученных результатов исследования доказывает полное отсутствие микротрещин в поверхностном слое детали, обработанной резанием с нагревом. При этом можно предположить, что полученный таким образом поверхностный слой будет работать в любом скользящем соединении в два-три раза дольше, чем соединение, собранное из деталей, обработанных обычным холодным способом.

### Библиографический список

1. Кузнецов А.В. Рентгенографическое определение плотности дислокаций в кристаллах и учет эффектов экстинкции: Учебное пособие по спецкурсу. Петрозаводск: Изд-во Петрозавод. ун-та, 1981. 68 с.
2. Конева Н.А. Классификация, эволюция и самоорганизация дислокационных структур в ме-

таллах и сплавах // Соросовский образовательный журнал. 1996. № 6. С. 97–107.

3. Дунин-Барковский Л.Р. Статистика и динамика коллективных дислокационных эффектов при неустойчивом пластическом течении: Дис. ...канд. физ.-мат. наук. Черноголовка, 1999. 118 с.

4. Тотай А.В. Инженерия поверхностей деталей машин с позиции их сопротивления усталости // Вестник Брянского гос. техн. ун-та. 2007. № 3 (15). С. 4–7.

5. Котельников В.И., Абдуллаев Ш.Р. Обработка сварных деталей резанием с нагревом, совмещенным с ППД // Заготовительное производство. 2007. № 7. С. 10–12.

6. Технологические основы упрочнения и восстановления деталей термопластическим деформированием при ремонте машин: Монография / И.Н. Кравченко, В.И. Котельников, А.Ф. Пузряков и др. М.: Изд-во «Эко-Пресс», 2010. 252 с.

7. Термодинамическое упрочнение сварных и наплавленных изделий сельскохозяйственного машиностроения: Монография / Е.М. Зубрилина, Е.В. Зубенко, И.Н. Кравченко. Ставрополь: Изд-во «АГРУС», 2012. 392 с.

8. Increase of hardness and wear resistance of machine working elements at the expense of their hardening with short-circuited arc surfacing applying ceramic metal materials / N. Titov, A. Kolomeichenko, V. Logachev, I. Kravchenko, N. Litovchenko // Scientific and Technical Journal: Technical diagnostics. Vol. XIII. No 2. 2014. Pp. 7–11.

9. Investigation of the hardness and wear resistance of working sections of machines hardened by vibroarc surfacing using cermet materials / N.V. Titov, A.V. Kolomeichenko, V.N. Logachev, I.N. Kravchenko // Welding International. 2015. Vol. 29, Issue 9. Pp. 737–739. DOI: 10.1080/09507116.2014.970336.

10. Investigation of the thickness and microhardness of electrospark coatings of amorphous and nanocrystalline alloys / A.V. Kolomeichenko, I.S. Kuznetsov, I.N. Kravchenko // Welding International. 2015. Vol. 29, Issue 10. Pp. 823–825. DOI: 10.1080/09507116.2014.986892.

11. Лившиц Б.Г. Металлография: Учебник. 3-е изд., перераб. и доп. М.: Металлургия, 1990. 236 с.

12. Кравченко И.Н., Зубенко Е.В., Ерофеев М.Н. Исследование тепловых параметров и режимов обработки наплавленного слоя термоупруго-пластическим деформированием при восстановлении деталей // Труды Всероссийского научно-исследовательского технологического института ремонта и эксплуатации машинно-тракторного парка. Т. 113. М.: ГОСНИТИ, 2013. С. 278–286.

13. Башмаков В.И. Пластификация и упрочнение металлических кристаллов при механическом двойниковании / В.И. Башмаков, Т.С. Чикова. Минск: УП «Технопринт», 2001. 218 с.

14. Кравченко И.Н., Зубрилина Е.М., Зубенко Е.В. Обработка корпусных чугунных заготовок резанием с нагревом // Механизация и электрификация сельского хозяйства. 2012. № 2. С. 29–31.

15. Кравченко И.Н., Зубенко Е.В. Влияние резания с нагревом на прочностные свойства наплавленных деталей // Труды Всероссийского научно-исследовательского технологического института ремонта и эксплуатации машинно-тракторного парка: Т. 113. М.: ГОСНИТИ, 2013. С. 339–346.

16. Котельников В.И., Гаврилов Г.Н., Мионов А.Е., Гаврин В.С. Повышение качества поверхностного слоя накатыванием металла с нагревом // Современные проблемы науки и образования. 2014. № 4. URL: <http://www.science-education.ru/ru/article/view?id=14121>.

Статья поступила 24.02.2016

## STUDYING DISLOCATION DENSITY INTERRELATIONSHIP IN DEFORMED PARTS OF METAL SURFACE

**IGOR N. KRAVCHENKO**, DSc (Eng), Professor<sup>1</sup>

E-mail: [kravchenko-in71@yandex.ru](mailto:kravchenko-in71@yandex.ru)

**VLADIMIR I. KOTELNIKOV**, PhD (Eng), Associate Professor<sup>2</sup>

E-mail: [nntu@nntu.nnov.ru](mailto:nntu@nntu.nnov.ru)

**MICHAEL V. DOBYCHIN**<sup>1</sup>

E-mail: [mr.kep@yandex.ru](mailto:mr.kep@yandex.ru)

**KIRILL V. MAKAROV**<sup>1</sup>

E-mail: [makarov177@rambler.ru](mailto:makarov177@rambler.ru)

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

<sup>2</sup> Nizhny Novgorod State Technical University named after R.E. Alekseyev, Minina str., 24, Nizhny Novgorod, 603950, Russian Federation

The problem of durability is closely connected with the study of the destruction and hardening processes in surface layers of metals in the course of their interaction. This problem can be solved by studying the change patterns in the structures of the metal surface layer. Also problematic is the question of the wear kinetics and its relationship with the processes of plastic deformation of the metal surface layer. The paper is devoted to the determination of quantitative relationship between the accumulated dislocation density in a deformed area of the surface layer of a thick-walled steel sleeve treated with cold burnishing and its heat cutting. The paper features a theoretical analysis of this relationship, based on solid-state physics, in particular, the theory of dislocations, as well as its engineering implications. Depending on the conditions and the processing type of construction and alloy steel, the authors have obtained different values of dislocation density in metals. The established mutual influence patterns of plastic deformation processes in the metal surface layer can determine ways of controlling the wear-resistance of materials. Experimental studies have shown that the metal sleeve surface treated with a conventional cold method has turned out to be covered with visible open microcracks inclined in the direction of burnishing. The heat-treated surface layer of the metal sleeve has not manifested such microcracks. Visual comparison of the study results has proved the complete absence of cracks in the surface layer of parts processed by cutting with heating. Basing on these observations it can be assumed that the obtained surface layer would serve in any sliding joint two or three times longer as compared with the joint assembled from components treated with a cold conventional method. It has been shown that taking into account the dislocation distribution pattern is essential for optimizing dislocation density calculation.

**Key words:** dislocation structure; microcracks; treatment of parts; plastic deformation; plastic shear; dislocation density; surface layer.

## References

1. Kuznetsov A.V. Rentgenograficheskoe opredelenie plotnosti dislokatsiy v kristallakh i uchet effektivov ekstinktsii: Uchebnoe posobie po spetskursu [X-ray determination of the density of dislocations in crystals with account of extinction effects: Tutorial on a special course]. Petrozavodsk: Publishing house of Petrozavodsk State University, 1981. 68 p.
2. Konev N.A. Klassifikatsiya, evolyutsiya i samoorganizatsiya dislokatsionnykh struktur v metallakh i splavakh [Classification, evolution and self-organization of dislocation structures in metals and alloys] // *Soros Educational Journal*. 1996. No 6. Pp. 97–107.
3. Dunin-Barkovskii L.R. Statistika i dinamika kolektivnykh dislokatsionnykh effektivov pri neustoychivom plasticheskom techenii: Dis. ...kand. fiz.-mat. nauk [Statistics and dynamics of collective dislocation effects in unstable plastic flow: PhD (Math) thesis]. Chernogolovka, 1999. 118 p.
4. Totai A.V. Inzheneriya poverkhnostey detaley mashin s pozitsii ikh soprotivleniya ustalosti [Engineering of surfaces of machine parts in terms of their fatigue resistance] // *Herald of Bryansk State Technical University*. 2007. No 3 (15). Pp. 4–7.
5. Kotelnikov V.I., Abdullayev Sh.R. Obrabotka svarnykh detaley rezaniem s nagrevom, sovmeshchenym s PPD [Processing of welded parts with heated cutting combined with surface-plastic deformation] // *Zagotovitel'noe proizvodstvo [Blank production]*. 2007. No 7. Pp. 10–12.
6. Tekhnologicheskie osnovy uprochneniya i vosstanovleniya detaley termoplasticheskim deformirovaniem pri remonte mashin: Monografiya [Technological basics of strengthening and restoring parts of thermo-plastic deformation during machinery repair: Monograph] / I.N. Kravchenko, V.I. Kotelnikov, A.F. Puzryakov and others. M.: Publishing house "Eco-Press", 2010. 252 p.
7. Termodinamicheskoe uprochnenie svarnykh i naplavlennykh izdeliy sel'skokhozyaystvennogo mashinostroeniya: Monografiya [Thermodynamic hardening of welded and built-up products Agricultural Engineering: Monograph] / Ye.M. Zubrilina, Ye.V. Zubenko, I.N. Kravchenko. Stavropol: Publishing house "Agrus", 2012. 392 p.
8. Increase of hardness and wear resistance of machine working elements at the expense of their hardening with short-circuited arc surfacing applying ceramic metal materials / N. Titov, A. Kolomeichenko, V. Logachev, I. Kravchenko, N. Litovchenko // *Scientific and Technical Journal: Technical diagnostics*. Vol. XIII. No 2. 2014. Pp. 7–11.
9. Investigation of the hardness and wear resistance of working sections of machines hardened by vibroarc surfacing using cermet materials / N.V. Titov, A.V. Kolomeichenko, V.N. Logachev, I.N. Kravchenko // *Welding International*. 2015. Vol. 29, Issue 9. Pp. 737–739. DOI: 10.1080/09507116.2014.970336.
10. Investigation of the thickness and microhardness of electrospark coatings of amorphous and nanocrystalline alloys / A.V. Kolomeichenko, I.S. Kuznetsov, I.N. Kravchenko // *Welding International*. 2015. Vol. 29, Issue 10. Pp. 823–825. DOI: 10.1080/09507116.2014.986892.
11. Livshits B.G. Metallografiya: Uchebnik. 3-e izd., pererab. i dop. [Metallography: textbook. 3rd ed., rev. and ext.]. M.: Metallurgiya [Metallurgy], 1990. 236 p.
12. Kravchenko I.N., Zubenko Ye.V., Yerofeyev M.N. Issledovanie teplovykh parametrov i rezhimov obrabotki naplavlennogo sloya termouprugo-plasticheskim deformirovaniem pri vosstanovlenii detaley [Research of thermal parameters and processing modes of the layer deposited with thermal elasticoplastic de-

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, профессор<sup>1</sup>

E-mail: Boss2569@yandex.ru

**ПЕГУШИН АЛЕКСАНДР ВЛАДИМИРОВИЧ**<sup>1</sup>

E-mail: alexpegushin@mail.ru

<sup>1</sup> 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.