

## **АНАЛИТИКА ПРИМЕНЕНИЯ МЕТОДА ПОВЕРХНОСТНОГО ПЛАСТИЧЕСКОГО ДЕФОРМИРОВАНИЯ НА ОПЕРАЦИЯХ УПРОЧНЕНИЯ ДЕТАЛЕЙ ОБЩЕМАШИНОСТРОИТЕЛЬНЫХ ПРОИЗВОДСТВ**

*Представлен аналитический обзор обработки деталей методом поверхностного пластического деформирования. Приведены статистические данные повышения твердости различных сталей, а также графические зависимости для определения глубины наклепанного слоя, остаточных напряжений, микротвердости углеродистых сталей с различными структурами. Указана целесообразность и возможности применения виброобработки на операциях ударного упрочнения поверхностного слоя деталей.*

**Ключевые слова:** аналитика, упрочнение, поверхностное пластическое деформирование, твердость, остаточные напряжения, виброобработка, амплитуда колебаний, технология виброупрочнения.

### **1. Введение и обзор исследований**

В современном машиностроении актуальна проблема повышения ресурса, надежности и работоспособности машин, а так же, экономии материальных, энергетических и трудовых ресурсов.

Вместе с тем, применяемая в механообрабатывающих производствах финишная обработка, как правило, обеспечивает геометрическую точность, форму и расположение поверхностей, а требуемому качеству поверхностного слоя уделяется меньшее внимание. Особую роль для повышения прочности деталей машин играют технологические процессы упрочнения. Известны следующие методы упрочнения: термические, криогенные; химико-термические; физико-химические; физические; методы поверхностного пластического деформирования [1].

Упрочнение поверхностным пластическим деформированием (ППД) позволяет создать поверхностный слой с заданными геометрическими, точностными, физико-механическими и прочностными свойствами. Упрочнение ППД реализуется за счет многократного поверхностного локального пластического деформирования обрабатываемой поверхности. Наряду со снижением высотных параметров шероховатости поверхности упрочнение ППД обеспечивают образование наклепа и формирование сжимающих остаточных напряжений, вызывают благоприятные структурные изменения и частичную релаксацию ранее образованных технологических напряжений.

В настоящее время широко используются различные методы отделочно-упрочняющей обработки деталей поверхностным пластическим деформированием (ППД), а именно: обкатка шариками и роликами, алмазное выглаживание, галтовка в барабанах, пневмодинамический наклеп, дробеструйная и дробеметная обработка, вибронакатывание и вибровыглаживание, обработка щетками, шарико-стержневое упрочнение. Методы обработки ППД получают дальнейшее развитие: разработаны новые методы гидродробеструйного упрочнения, экструзионной обработки, ультразвукового упрочнения, комбинированные методы местного упрочнения, виброударной обработки, включающей в себя виброабразивную обработку, виброударное упрочнение и виброполирование, виброгалтовку [2, 3, 4, 5].

Теория ударных процессов является основой для изучения виброударного процесса [6, 7, 8]. При этом на основе теории вибрационного перемещения рабочих сред иссле-

дуются процессы виброобработки, которые представляют интерес для проектирования виброударных технологий и оборудования.

Как известно, упругопластическое деформирование осуществляется двумя способами, состоящими в воздействии твердых тел или концентрированных потоков энергии, направленных на поверхности деталей. ППД твердыми телами наиболее распространенный способ упрочнения. Его осуществляют воздействием на обрабатываемую поверхность деформирующих элементов. Взаимодействие деформирующего элемента с поверхностью можно разделить на две группы: квазистатическую и динамическую. Квазистатическая группа предполагает создание деформирующего усилия от непрерывного контакта инструмента с деталью. В динамической группе пластическое деформирование поверхностного слоя осуществляется многократным ударным воздействием гранул рабочей среды на обрабатываемую поверхность детали.

## 2. Характер изменения параметров поверхностного слоя под действием пластического деформирования

Известно, что у не закаленных сталей при их поверхностном деформировании наблюдается увеличение твердости более чем на 100 %, а у закаленных — только на 10...15 % [3, 9, 10]. Прирост твердости определяется структурой деформируемой стали. Наибольшее повышение твердости наблюдается у сталей с аустенитной, ферритной и мартенситной структурами, наименьшее — с перлитной и сорбитной структурами. Абсолютный прирост твердости в результате наклепа составляет: для мартенситных структур 180...320 НВ; для сталей, содержащих избыточный феррит, 60...120 НВ. Структурные составляющие имеют различную способность упрочнения. Для структуры мартенсита глубина наклепанного слоя больше, чем при тех же условиях для других структур. Структуры сорбита имеют наименьшую глубину наклепанного слоя (рис. 1).

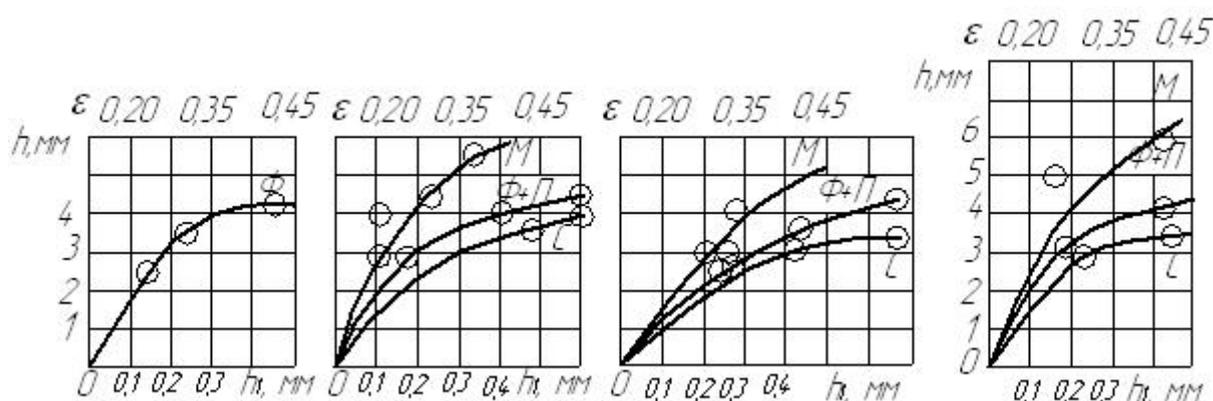


Рис. 1. Зависимость глубины наклепанной зоны  $h$  от глубины отпечатка  $h_1$

для углеродистых сталей с различными структурами:

$a$  – железо армко;  $b$  – сталь 35;  $в$  – сталь 45;  $г$  – сталь 50;

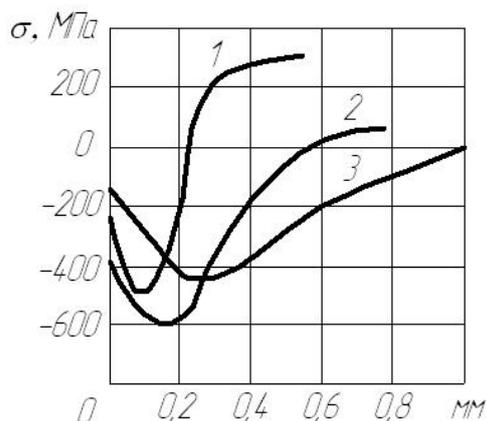
Ф – феррит; М – мартенсит; П – перлит; С – сорбит [3]

Установлено, что деформационное упрочнение характеризуется увеличением пределов текучести, твердости, хрупкости и снижением пластичности. Также претерпевают изменения эффекты ползучести, внутреннего трения, электросопротивления, коэрцитивной силы, магнитной проницаемости, остаточной индукции. Эти изменения физико-механических свойств поверхностного слоя металла зависят от степени пластического деформирования, и их необходимо учитывать при выборе режимов ППД на операциях обработки деталей различного назначения.

Распределение остаточных напряжений по глубине поверхностного слоя, как правило, имеет характерный вид (рис. 2) [11, 12]. Различные технологические режимы, позволяют варьировать глубину распределения остаточных напряжений, которая в основном

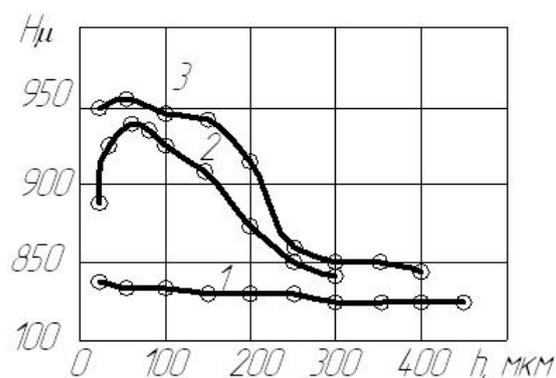
пропорционально возрастает с ростом размеров очага деформации. Что касается интенсивности сжимающих напряжений, то основное влияние на нее оказывает скорость пластического деформирования и продолжительность обработки.

Так же исследовано распределение микротвердости в поверхностном слое после ППД [11, 12]. Форма кривой распределения микротвердости по толщине поверхностного слоя до некоторого момента не имеет подслоного максимума (рис. 3). Зависимость глубины и интенсивности прироста микротвердости от технологических режимов такое же, как и остаточных сжимающих напряжений. Однако, при длительном времени упрочнения рост микротвердости на поверхности прекращается. Несмотря на дальнейший рост микротвердости под поверхностью, явление поверхностного перенаклепа отрицательно сказывается на контактной выносливости и усталостной прочности.



**Рис. 2.** Остаточные напряжения по глубине упрочненного слоя в образцах из стали 18Х2Н4ВА после:

1 – наклепа дробью; 2 – центробежно-шариковой обработки; 3 – раскатывания [13]



**Рис. 3.** Изменение микротвердости эвольвенты зуба шестерни из стали 20ХЗВМФ в зависимости от продолжительности обработки твердосплавными шарами:

1 – исходная; 2 –  $T = 300$  мин; 3 –  $T = 180$  мин [14]

При завышенных силовых параметрах ударной обработки происходит перенаклеп, в результате которого в поверхностном слое появляются микротрещины, намечается образования отслаивающегося металла, поверхностные зерна сплющиваются и становятся неразличимыми, увеличивается шероховатость поверхности. Наклеп металла можно снять путем отжига. Перенаклеп — необратимый процесс, при котором нагрев не восстанавливает исходную структуру металла и его механические свойства.

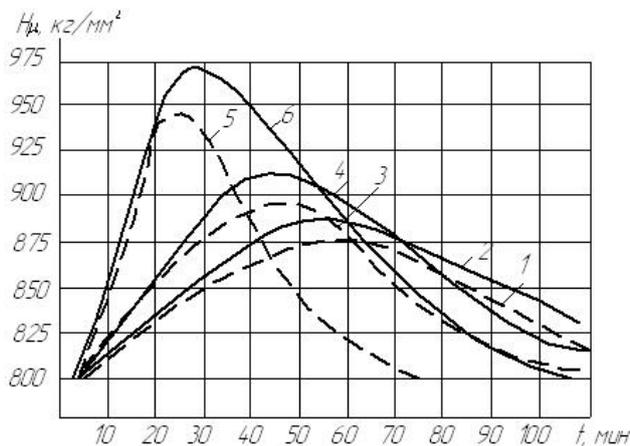
Таким образом, методы ППД являются наиболее эффективными и универсальными способами упрочнения деталей. Перечень методов разнообразен, но при этом явления, происходящие в поверхностном слое, имеют общий характер. Проведенный анализ закономерностей процесса ППД показал, что схема деформации остается практически неизменной. Влияние методов ППД на физико-механические и эксплуатационные свойства деталей определяется не столько методом, сколько технологическими режимами, которые возможно обеспечить. Глубина упрочнения, прирост микротвердости поверхностного слоя, а также усталостная прочность, износостойкость, контактная выносливость полностью связаны с условиями энергетического воздействия, которое обеспечивают методы ППД. Различные методы ППД рассматривают с единых позиций, что позволяет выработать методику оценки эффективности упрочнения.

### 3. Общность отделочно-зачистных и упрочняющих операций виброобработки

В отличие от отделочно-зачистной вибрационной обработки, где съем металла является главным показателем производительности процесса, при виброупрочняющей обработке

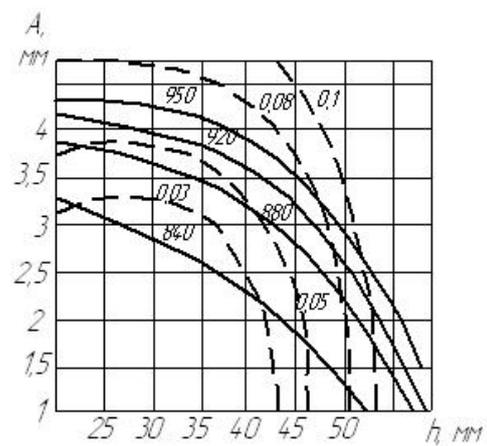
ударного характера этот показатель отсутствует и задачей обработки является создание слоя с повышенной микротвердостью достаточной толщины.

Из графиков (рис. 4–7) очевидна зависимость результатов упрочнения от амплитуды колебаний рабочей среды в контейнере вибростанка. При этом временные зависимости носят экстремальный характер, а это значит, что процесс упрочнения за определенное время достигает насыщения, после чего следует разупрочнение, сопровождающееся ухудшением состояния поверхности. Экспериментами установлено, что роль частоты колебаний при упрочнении отличается от таковой при отделочно-зачистной виброобработке. А именно, частота определяет общее количество ударов гранул среды, воспринятых упрочняемой поверхностью детали, а амплитуда формирует силу удара, необходимую для процесса упрочнения.



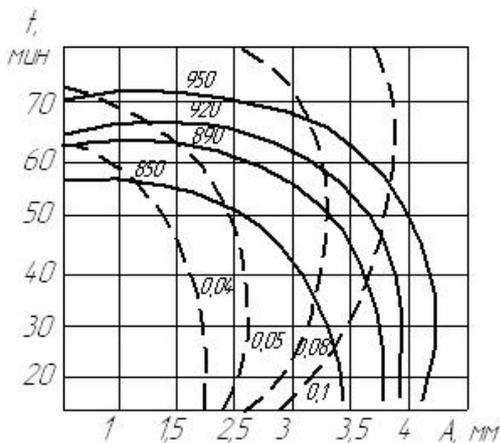
**Рис. 4.** Влияние времени обработки ( $t$ ), амплитуды вибрации ( $A$ ), диаметра шарика на значение поверхностной микротвердости сталей X12M и P18 ( $f = 35$  Гц):

1, 2 –  $A = 2$  мм; 3, 4 –  $A = 2,5$  мм; 5, 6 –  $A = 3,5$  мм;  
1, 3, 5 –  $d = 8$  мм; 2, 4, 6 –  $d = 14$  мм [10, 15]



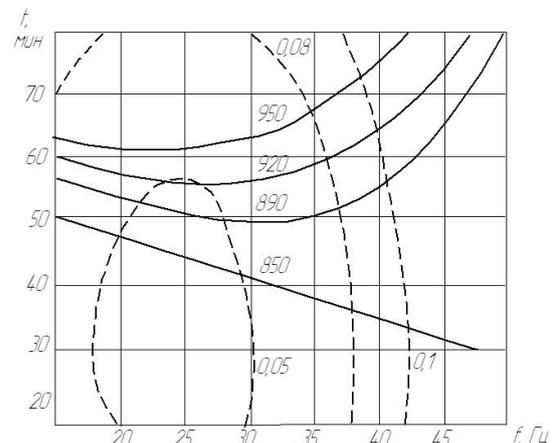
**Рис. 5.** Зависимость поверхностной микротвердости  $H_{\mu}$  ( $\text{кг}/\text{мм}^2$ ) и глубины упрочнения  $h$  (мм) от амплитуды  $A$  и частоты  $f$  вибрации:

$d = 11$  мм,  $t = 50$  мин [10, 15]



**Рис. 6.** Зависимость поверхностной микротвердости  $H_{\mu}$  ( $\text{кг}/\text{мм}^2$ ) и глубины упрочнения  $h$  (мм) от времени обработки  $t$  и амплитуды вибрации:

$d = 11$  мм [10, 15]



**Рис. 7.** Зависимость поверхностной микротвердости  $H_{\mu}$  ( $\text{кг}/\text{мм}^2$ ) и глубины упрочнения  $h$  (мм) от времени  $t$  и частоты  $f$  вибраций [10, 15]

Таким образом, при виброударном упрочнении обеспечивается равномерность обработки, исключается перенаклеп, отсутствует вредное тепловое воздействие. Вместе с тем снижается шероховатость, волнистость и пористость, локализуется воздействие поверхностных микродефектов деталей, изготовленных прессованием из порошков, релаксируются технологические напряжения.

Перечисленные результаты виброупрочнения обеспечиваются выбором оптимальных режимов обработки для соответствующих условий эксплуатации деталей и изделий в целом. Необходимо уточнить, что процессы виброударного упрочнения сохраняют точность линейных размеров, расположение и формы поверхностей, достигнутые на предыдущей операции [16].

Виброударное упрочнение применяется в производстве деталей сложной формы после механической обработки или абразивной зачистки. При этом обрабатываемые детали, с помощью специальных приспособлений устанавливаются в контейнере вибростанка. Контейнер на 70–80 % объема заполняется рабочей средой, состоящей из стальных шариков и технологической жидкости. Под действием колебаний контейнера с амплитудой, соответствующей виброскорости 80–160 см/с, рабочая среда приобретает способность сопрягаться с поверхностью детали, и периодически соударяясь с ней, образует множество пластических отпечатков, которые по мере обработки образуют упрочненный поверхностный слой.

#### **4. Характеристики параметров технологии виброударного упрочнения**

Основными параметрами технологического процесса виброударного упрочнения являются: амплитуда и частота колебаний; форма траектории движения контейнера; скорость циркуляции деталей; диаметр гранул рабочей среды и состав технологической жидкости; объем загрузки и продолжительность упрочнения. Для виброударного упрочнения выбираются следующие значения параметров: амплитуда колебаний 5...12 мм, частота колебаний 24...100 Гц; форма траектории: от круговой до эллипсной и линейной. Скорость вращения детали составляет до 5 об/мин. Диаметр шариков выбирается в зависимости от радиуса галтелей и сопряжений поверхностей деталей, а также требуемой глубины наклепа, величины и глубины формирования остаточных напряжений: в пределах от 1,5 до 20 мм. Объем загрузки рабочей среды в контейнер незамкнутой формы составляет 70–75 %.

Продолжительность упрочнения 45...90 мин определяется опытным путем исходя из величины прогиба образцов свидетелей. В этом случае гарантируется равномерное упрочнение детали сложной формы со следующими технологическими показателями: шероховатость поверхности  $Ra = 0,63...0,4$  мкм при исходной не более  $Ra = 1,25$  мкм; остаточные напряжения 600...650 МПа; наклеп 8–10 %; глубина наклепа 0,32...0,35 мм [16, 17].

При виброупрочняющей обработке сталей типа 30ХГСНА, ВНС малоцикловая усталостная долговечность повышается в 2,5...3 раза, сталей типа ВКС в 4 раза, а последующее виброударное упрочнение их повышает малоцикловую усталостную долговечность соответственно в 2,8...3,5 раза и 4,7...5,5 раза. Для алюминиевых сплавов типа Д16Т виброударное упрочнение повышает усталостную долговечность в 3...5 раз. Коррозионно-усталостная долговечность при виброударном упрочнении также повышается: для стали 30ХГСНА в 1,5...2 раза, для Д16Т в 3...3,5 раза. При анодировании образцов из Д16Т и последующем виброударном упрочнении коррозионно-усталостная долговечность возрастает в 1,2...1,5 раза; в то время как анодирование без упрочнения снижает ее в 1,7...2,3 раза. Коррозионная стойкость при образовании наклепа, предшествующему по величине перенаклепу, возрастает: для стали 30ХГНА, при испытании в 5-процентном водном растворе соли NaCl — в 2,5...3 раза в сравнении со шлифованными образцами. При совмещении виброударного упрочнения с нанесением коррозионно-стойких покрытий, например, дисульфида молибдена, коррозионная стойкость возрастает в 3...8 раз. Контактная прочность при виброударном упрочнении возрастает до 1,5...2 и более раз, микротвердость повышается до 1,25...1,8 раза, радиус выступов микронеровностей увеличивается в 3...5 раз. В этой связи износостойкость виброупрочненных деталей на этапе приработки возрастает, например, для стали Х12Ф1 с исходной шероховатостью поверхности  $Ra 1,25...0,8$  мкм в 1,3...1,8 раза, в сравнении со шлифованной поверхностью [16]. Данные результаты говорят о перспективном использовании данного метода виброударного упрочнения.

Рассмотрев результаты теоретических и экспериментальных исследований виброобработки, и применение её для ППД, можно отметить ряд общих закономерностей и особенностей.

1. Процесс виброобработки характеризуется отсутствием жесткой кинематической связи между вибростанком, инструментом и деталями. При этом инструмент (рабочая среда) представляет собой совокупность гранул, движущихся под действием силового импульса, передаваемого от вибровозбудителя через стенки контейнера.

2. Удаление металла осуществляется выступами абразивных зерен путем микрорезания. Профиль шероховатости обработанной поверхности формируется за счет многократного наложения и пересечения абразивных царапин. Изменение шероховатости поверхности имеет экспоненциальный характер с достижением установившегося значения. С возрастанием времени обработки пропорционально увеличивается съём металла и снижается микрошероховатость.

3. Поверхностное пластическое деформирование, как и формирование профиля микрошероховатости обработанной поверхности, осуществляется в результате многократного наложения и пересечения отпечатков, полученных от силового воздействия металлических гранул, в виде стальных или чугунных шариков.

4. Наличие рабочих растворов, их свободный подвод в зону обработки, возможность ввода химически активных и поверхностно-активных веществ.

5. Низкотемпературный характер обработки. Отсутствие на обработанной поверхности температурных дефектов в виде прижогов и микротрещин.

6. Возможность обработки деталей сложной формы из любых материалов.

7. Общие технологические возможности: осуществление шлифования, полирования, упрочнения, очистки, мойки, удаление заусенцев и облоя.

**Выводы.** Аналитика исследований, виброударного упрочнения, проведенных в НИЛ «ОСА» ВНУ им. В. Даля [18] показывает, что такая технология является эффективным средством снижения высотных параметров шероховатости поверхности, улучшения структуры микронеровностей, формирования сжимающих остаточных напряжений и наклепа в деталях сложной формы. Технологические процессы виброударного упрочнения позволяют улучшить эксплуатационные свойства изделий, а именно: повысить усталостную, контактную, коррозионную прочность и долговечность; увеличить коррозионную и температурную стойкость.

#### Литература

1. Кулаков, Ю.М. *Отделочно-зачистная обработка деталей [Текст]* / Ю.М. Кулаков, В.А. Хрульков. – М.: Машиностроение, 1979. – 216 с.
2. *Обработка деталей свободными абразивами в вибрирующих резервуарах [Текст]* / И.Н. Карташов, М.Е. Шаинский, В.А. Власов и др. – К.: Высшая школа, 1975. – 179 с.
3. *Абразивная и алмазная обработка материалов [Текст]: справ. / Под ред. А.Н. Резникова.* – М.: Машиностроение, 1979. – 216 с.
4. *Абразивные материалы и инструменты. Каталог-справочник.* – М.: НИИ по машиностроению, 1981. – 360 с.
5. Димов, Ю.В. *Обработка деталей свободным абразивом [Текст]* / Ю.В. Димов. – Иркутск: ИрГТУ, 2000. – 292 с.
6. Байкалов, А.К. *Введение в теорию шлифования материалов [Текст]* / А.К. Байкалов. – К.: Наукова думка, 1978. – 270 с.
7. Королев, А.В. *Теоретико-вероятностные основы абразивной обработки [Текст]* / А.В. Королев, Ю.К. Новоселов. – Саратов: Изд-во Саратовского ун-та, 1989. – 320 с.
8. Маслов, Е.Н. *Теория шлифования материалов [Текст]* / Е.Н. Маслов. – М.: Машиностроение, 1974. – 319 с.
9. *New ways to grind and finish // Metalwork. Prod* – 1994. – 38, № 5. – 138 с.
10. Бабичев, А.П. *Основы вибрационной технологии [Текст]* / А.П. Бабичев, И.А. Бабичев. – Изд. 2-е, перераб. и доп. – Ростов н/Д: Изд. центр ДГТУ, 2008. – 694 с.

11. Якимов, А.В. Абразивно-алмазная обработка фасонных поверхностей [Текст] / А.В. Якимов. – М.: Машиностроение, 1984. – 312 с.
12. Вибрационные станки для обработки деталей [Текст] / А.П. Бабичев, В.Б. Трунин, Ю.М. Самодумский и др. – М.: Машиностроение, 1984. – 168 с.
13. Бойко, М.А. Повышение технологических характеристик абразивных гранул для виброабразивной обработки: дис. ... канд. техн. наук: 05.02.08. – Ростов-на-Дону, 2000. – 165 с.
14. Отделочно-упрочняющая обработка деталей многоконтактным виброударным инструментом [Текст] / А.П. Бабичев, П.Д. Мотренко и др. – Ростов н/Д: изд. центр ДГТУ, 2003. – 192 с.
15. Негруб, С.Л. Повышение эффективности финишной обработки эластичными полимер-абразивными инструментами: дис. ... канд. техн. наук: 05.02.08. – Днепрпетровск, 2008. – 210 с.
16. Вибрационные машины и технологии. Часть 1 / С.Ф. Яцун, Д.Н. Сафаров, В.Я. Мищенко и др.: Элм, 1999. – 142 с.
17. Бабичев, А.П. Вибрационная обработка деталей [Текст] / А.П. Бабичев. – М.: Машиностроение, 1974. – 134 с.
18. Волков, И.В. Повышение производительности процесса вибрационной обработки деталей на отделочных и упрочняющих операциях: дис. ... канд. техн. наук: 05.02.08. – Одесса, 2008. – 174 с.

© И.В. Волков

**І.В. Волков, к.т.н., доц.**

Східноукраїнський національний університет ім. Володимира Даля

#### **АНАЛІТИКА ВИКОРИСТАННЯ МЕТОДА ПОВЕРХНЕВОГО ПЛАСТИЧНОГО ДЕФОРМУВАННЯ НА ОПЕРАЦІЯХ ЗМІЦНЕННЯ ДЕТАЛЕЙ ЗАГАЛЬНОБУДІВНИХ ВИРОБНИЦТВ**

*Представлено аналітичний огляд обробки деталей методом поверхневого пластичного деформування. Наведено статистичні дані підвищення твердості різних сталей, а також графічні залежності, щодо визначення глибини наклепаного шару, залишкових напруг, мікротвердості вуглецевих сталей з різноманітними структурами. Вказано можливості використання віброобробки на операціях ударного зміцнення поверхневого шару деталей.*

**Ключові слова:** аналітика, зміцнення, поверхневе пластичне деформування, твердість, залишкові напруги, віброобробка, амплітуда коливань, технологія віброзміцнення.

**I.V. Volkov, Ph.D., Associate Professor**

Volodymyr Dahl East Ukrainian National University

#### **ANALYTICS OF APPLYING METHOD OF SURFACE PLASTIC DEFORMATION ON THE OPERATIONS OF HARDENING OF PARTS IN GENERAL MACHINE-BUILDING INDUSTRIES**

*An analytical review of processing of parts by surface plastic deformation is presented. The statistical data of increase of the hardness of various steels, and the graphical dependence for determining depth of the cold-hardened layer, residual stresses, micro-hardness of carbon steels with different structures are given. Advisability and possibility of applying of vibration treatment on operations of hardening of surface layer of parts are shown.*

**Keywords:** analytics, hardening, surface plastic deformation, hardness, residual stresses, vibration treatment, the amplitude of oscillation, the technology of vibrational hardening.